

**WEIMARER MONOGRAPHIEN
ZUR UR- UND FRÜHGESCHICHTE**

Herausgegeben vom Museum für Ur- und Frühgeschichte Thüringens
durch Rudolf Feustel

16

Sigrid Dušek
Wolfgang Müller

Hans Hohmann
Walter Schmidt

HAARHAUSEN I

Rekonstruktion eines Töpferofens und des Brennverfahrens

Vorwort	3
1. Archäologischer Befund	4
1.1. Topographisch-geologische Lage des Fundplatzes	4
1.2. Grabungsbefund	4
1.3. Fundmaterial	14
1.4. Chronologische und kulturell-ethnische Zuordnung des Fundplatzes	15
1.5. Parallelbefunde zum Töpferofen	15
2. Keramische Brenntechnik	18
2.1. Brenntechnische Einordnung der Fundkeramik und Öfen	18
2.2. Verfahrensgrundsätze	22
3. Rekonstruktion und Aufbau des Töpferofens	31
3.1. Rekonstruktion des Töpferofens	31
3.2. Ofenbau	34
3.3. Herstellung der Töpferware	37
4. Brennversuche im Töpferofen	38
4.1. Versuchsdurchführung	38
4.2. Beschickung des Töpferofens	46
4.3. Feuerungstechnik	53
4.4. Meßtechnische Überwachung der Brände	55
4.5. Ergebnisse	57
4.5.1. Spezifischer Energieverbrauch und Wärmebilanz des Ofens	57
4.5.2. Temperaturverteilung im Ofen und Gaszusammensetzung der Ofenatmosphäre	59
5. Auswertung	63
5.1. Bewertung der Töpferware	63
5.2. Bewertung des Brennverfahrens	65
5.3. Bewertung des Brennofens	66
5.4. Rekonstruktion von Produktionsumfang und -organisation	67
6. Zusammenfassung - Résumé - Summary - Обобщение	69
7. Anmerkungen	73
8. Literatur	74
Tafeln I - XXXII	

B 1955-7
(Handbeband)

MUSEUM
FÜR UR- U. FRÜHGESCHICHTE THÜRINGENS
WEIMAR
B I B L I O T H E K

Druck: Druckerei Volkswacht Gera, Zweigbetrieb Greiz

(c) 1986 by Museum für Ur- und Frühgeschichte Thüringens, Weimar
Nachdruck oder fotomechanische Vervielfältigung, auch einzelner
Teile, ist ohne ausdrückliche Genehmigung des Herausgebers nicht
gestattet.

"Durch bloßes logisches Denken vermögen wir kein Wissen über die Erfahrungswelt zu erlangen. Alles Wissen über die Wirklichkeit geht von der Erfahrung aus und mündet in ihr."

Albert Einstein

Der erstmalige archäologische Nachweis von Töpferöfen der römischen Kaiserzeit in Thüringen in einem Erhaltungszustand und Überlieferungsgrad, der optimale Ausgangsbedingungen für technologische Untersuchungen bot, erfolgte zu einer Zeit, als vom Institut für Bau- und Grobkeramik in Weimar das Hydratverfahren für den Garbrand von Ziegeln und Grobkeramik entdeckt und großindustriell entwickelt wurde. Die Übereinstimmung der äußeren Erscheinung der aus den archäologischen Töpferöfen stammenden Scherben mit den rezenten, im hydrothermalen Verfahren gebrannten keramischen Produkten gab den Anstoß zu einer erstmalig praktizierten Zusammenarbeit von Archäologen und Verfahrenstechnikern. Zwei zunächst getrennt laufende Forschungen von jeweils explizitem Charakter boten sich der interdisziplinären Kooperation als Mittel zur Gewinnung von Ergebnissen wissenschaftlichen Höchststandes. Wir waren uns dabei bewußt, daß diese neue Qualität nur erreicht wird, wenn nicht jede Disziplin (im konkreten Fall die Archäologie und die Verfahrenstechnik) isoliert recherchiert, sondern nach einer Phase längeren Herantastens nicht nur ein gemeinsamer Forschungsgegenstand gewählt, zugleich aber auch eine Methodik der interdisziplinären Zusammenarbeit entwickelt wird. Ausgangspunkt darf dazu nicht nur sein, "die Sprache des jeweils anderen" zu verstehen (Grimes 1969, S. 24; Groenman van Waateringen 1975, S. 1). Es sollte darüber hinaus eher angestrebt werden, eine gemeinsame "Sprache" zu finden. Das kann aber nur erfolgreich sein, wenn zunächst die Fragestellungen klar formuliert werden. Dabei kann als sicher angesehen werden, daß die historischen und gesellschaftswissenschaftlichen Zielstellungen von Archäologen formuliert werden, der Gewinn der fachspezifischen Naturwissenschaft oder der technischen Wissenschaften in entsprechenden einschlägigen Arbeiten seinen Niederschlag findet.

Es war unser Ziel, die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Erforschung der Keramikproduktion von Haarhausen nicht nur auf einzelne Analysen zu beschränken. Den besten Zugang zur "Erfahrungswelt" sahen wir im Nachvollziehen des gesamten Produktionsprozesses, in dessen Folge sich die Rekonstruktion des Ofens und des Arbeitsprozesses als Prüfstein für die Theorie erweisen mußte.

Mit Hilfe der Rekonstruktionen soll eine Einschätzung des Entwicklungsstandes der Produktivkräfte im Bereich der Keramikproduktion, speziell jener mit der Töpferscheibe verbunden, erfolgen. Dabei standen bei der gemeinsamen Arbeit (Dušek/Hohmann 1981, S. 217 ff.) folgende Probleme im Mittelpunkt:

- Aufwand an Material und gesellschaftlich notwendiger Arbeitszeit für den Ofenbau und für die Gefäßherstellungen sowie die Menge des Brennmaterials
- Technologische Untersuchung zum Verlauf des Brandes und zur Ofenatmosphäre
- Produktivität einer solchen Produktionsstätte durch Ermittlung der Kapazität des Ofens, der Dauer eines Zyklus kalt-kalt und der möglichen Anzahl von Brennvorgängen pro Jahr
- Produktionskennziffern als Grundlage für die Erfassung des Absatzgebietes dieser Produktionsstätte
- betriebsorganisatorisch-arbeitsteiliger Produktionsprozeß
- Entwicklungsstufe des Handwerks, gesellschaftliche Arbeitsteilung und frühe Warenproduktion

1. ARCHÄOLOGISCHER BEFUND

1.1. Topographisch-geologische Lage des Fundplatzes

Die Produktionsstätten von Töpfern aus der spätrömischen Kaiserzeit werden seit 1979 nördlich des Ortes Haarhausen, Kr. Arnstadt, auf der Flurstelle "Kleines Feld" untersucht. Diese Flur liegt östlich der Straße Haarhausen - Sülzenbrücken und bildet topographisch eine flache Einmuldung, aus der sich eine schwache Erhöhung mit einer Ost-West-Ausdehnung von 150 m und einer Höhenangabe von 257 m ü. NN abhebt. Auf dieser schwach sichtbaren Geländekuppe befinden sich die Keramikproduktionsstätten. In etwa 150 m Entfernung verlief östlich des Fundplatzes der ehemalige Keltergraben, ein wahrscheinlich mittelalterliches Meliorationssystem aus eingetieftem Graben, flankiert von beidseitigen wallartigen Aufschüttungen. Der heute eingeebnete Graben stellt die Fortsetzung des von Holzhausen nach Haarhausen in SN-Richtung verlaufenden Vasolde-Baches dar.

Die Fundstelle liegt dicht an der Grenze der Wachsenburg-Mulde, einer Einmuldung des mittleren Keupers, deren nördliche Begrenzung Muschelkalkhorste bilden, wie die von SO nach NW streichenden Horste des Weinberges bei Arnstadt, des Kalkberges, des Katzenberges und Weinberges bei Haarhausen sowie des Längels (Wagenbreth/Steiner 1982, S. 100) (Abb. 1). Den geologischen Untergrund bildet unter einer Ackerkrume (ca. 30 bis 40 cm stark), einer liegenden Kulturschicht (ca. 30 cm mächtig) und einer etwa gleichstarken dunklen anmoorigen Schicht (Schichtenstärke variiert an den verschiedenen Grabungsstellen) der Keuper, vertreten durch gelblich-grün-grauen Letten mit Sandsteineinschaltungen und Tonmergel. Da signifikante Merkmale für den Grenzdolomit (Ku_2) fehlen, dürfte die Keuperschicht mit großer Wahrscheinlichkeit dem unteren Abschnitt des mittleren Keupers entsprechen. Verwitterungseinwirkungen auf die tonigen Bestandteile dieser Schicht bewirken deren Plastizität. Tonige Horizonte des mittleren Keupers streichen am NO-Hang des Weinberges bei Haarhausen in etwa 250 m Entfernung von der Grabungsfläche aus (Abb. 2). Die wasserhaltenden, undurchlässigen Schichten des liegenden Keupers bedingen einen hohen Grundwasserstand, der trotz erfolgter Melioration bis heute wirksam ist.

1.2. Grabungsbefund








Die Grabungstätigkeit auf dieser Fundstelle erbrachte in den Jahren 1979 bis 1985 - die Ausgrabung wird fortgesetzt - den Nachweis von drei Töpferöfen, mehreren Herdstellen, einer größeren Steinpflasterung, die offenbar der Tonaufbereitung diente, einigen Gebäuden mit Pfostensetzungen sowie von weiteren Produktionsstätten der Töpfer. Alle diese der Keramikherstellung dienenden Anlagen liegen nach dem bisherigen Grabungsstand südlich vor dem Ofenkomplex (Dušek 1984, S. 5 ff.; 1985, S. 285 ff.).

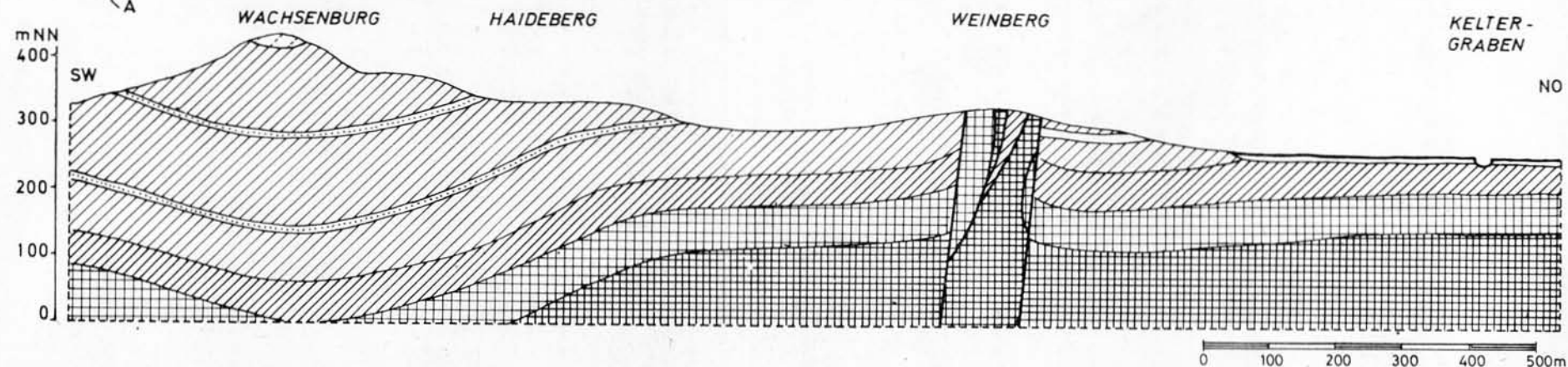
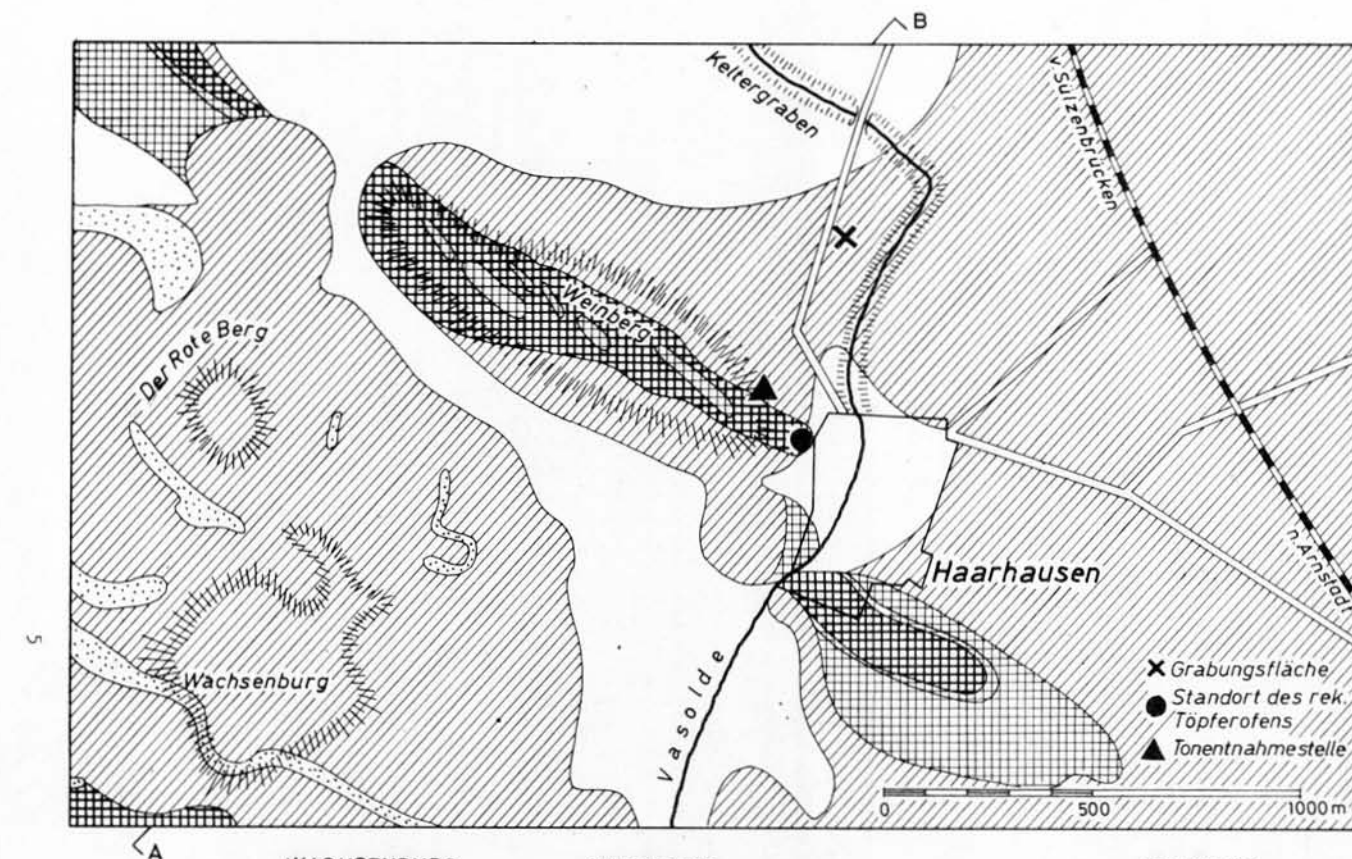
Aus dem bisher ergrabenen Gesamtkomplex soll hier nur der Töpferofen III vorgelegt werden, da er für die Rekonstruktion des Produktionsprozesses die größte Relevanz besitzt. Die nach gleichem Grundprinzip errichteten drei Töpferöfen unterscheiden sich dennoch durch viele Details. Zum besseren Verständnis wird dem archäologischen Befund die schematische Darstellung eines Töpferofens vorangestellt, die eine Übersicht über die sich im wesentlichen an Winter (1978, S. 26 ff.) anlehrende Terminologie vermitteln soll (Abb. 3).

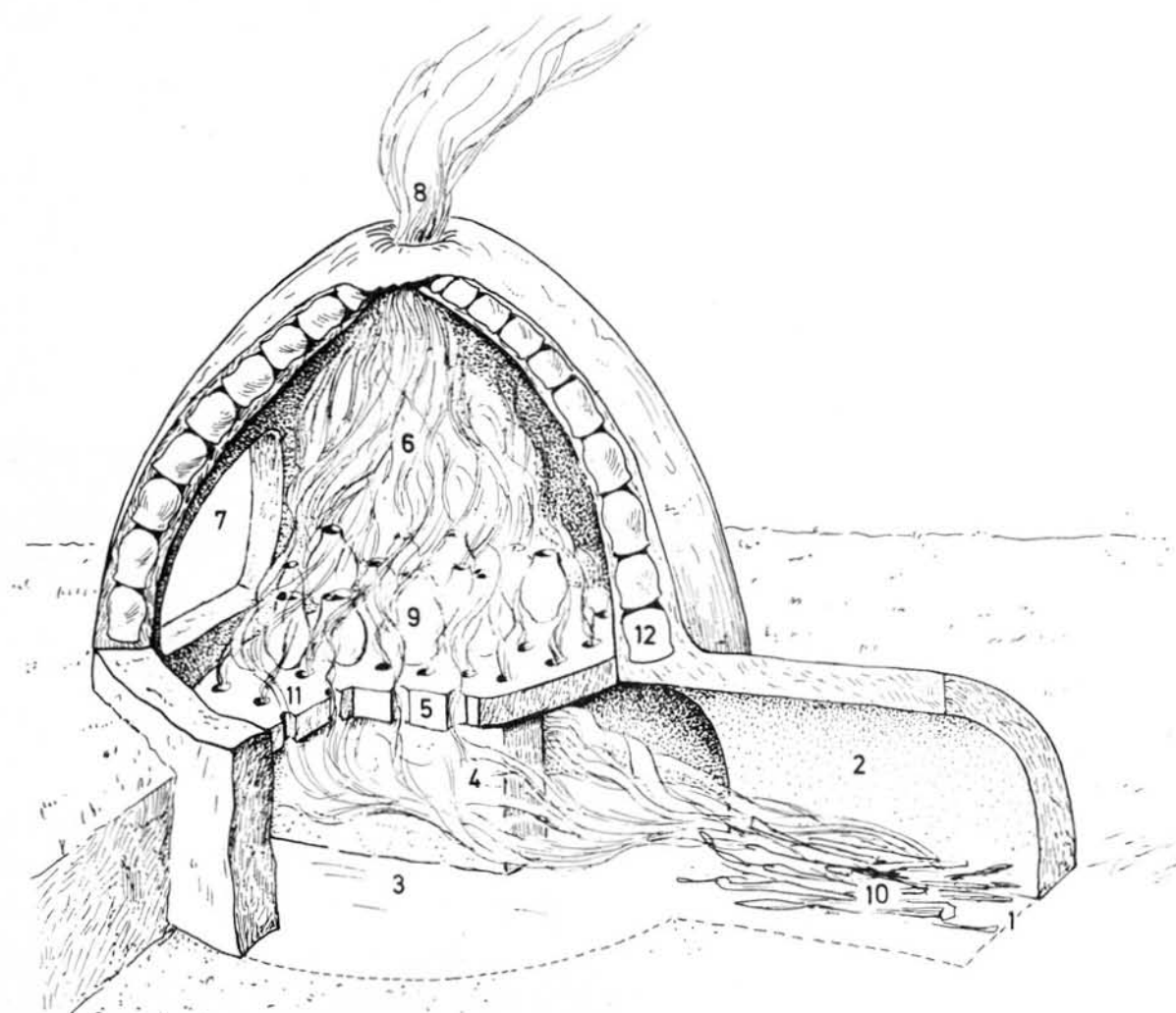
Der Töpferofen I (Iaf. I₁) ist bei einer Gesamtlänge von 5 m Süd-Nord orientiert. Dem durch einen massiven Steg in zwei Teile geteilten Feuerungsraum mit einer Brennraumfläche von ca. 5 m² ist ein langer Schürhals vorgelagert. Zum Bau des Ofens wurde präparierter gemagerter Lehm benutzt. Im Feuerungsraum, im Schürhals und in unmittelbarer Nähe des Ofens konnten größere Mengen von Drehscheibenkeramik und Holzkohle geborgen werden. Diese großen Dimensionen und fehlenden Detailbefunde ließen diesen Ofen nicht für eine Rekonstruktion in Frage kommen.

Abb. 1. Geologisch-topographische Lage des Fundplatzes Haarhausen (A-B-annähernder Verlauf des Profils).

Abb. 2. Geologisches Profil durch die Wachsenburg-Mulde.

-  Alluvium (Ebener Talboden der heutigen Gewässer: Auelehm, Schotter)
-  Gips
-  Oberer Keuper
-  Mittlerer Keuper
-  Unterer Keuper
-  Oberer Muschelkalk
-  Unterer und Mittlerer Muschelkalk





1 Schürhalsöffnung, 2 Schürhals, 3 Feuerungsraum/Hölle, 4 Steg, 5 Lochtenne, 6 Brennraum, 7 Einsetzöffnung, 8 Abzugsöffnung, 9 Brenngut (Keramik), 10 Brennmaterial (Holz), 11 Pfeifen, 12 Wölbtpöfe

Abb. 3. Rekonstruierter Töpferofen mit terminologischen Angaben (nach Winter 1978, etwas erweitert).

Parallel zu diesem Ofen befand sich der Töpferofen II. Bei einer Gesamtlänge von 4,5 m schließt sich auch hier dem runden Feuerungsraum ein langer Schürhals an. Dieser wurde - im Gegensatz zur Wandung des Feuerungsraumes - aus einer Lehm-packung errichtet. Nach dem Grabungsergebnis war zumindest die Wandung des Feuerungsraumes durch Steine, verbunden mit Lehm, aufgebaut worden. Innerhalb des Steinkreises lag ein Lehmring mit einem massiven Mittelsteg. Diese Konstruktion des Feuerungs- und Brennraumes läßt am ehesten an einen Muffelofen denken, bei dem das Brenngut gekapselt, d. h. isoliert von der Brenn-atmosphäre, gebrannt werden konnte. Im Ofen fand sich ausschließlich Drehscheibenkeramik, gemischt mit größeren Mengen von Holzkohle. Die doppelte Wandung des Ofens und die gekapselte Lage des Brenngutes wären der sicherste Garant für den Ausschluß von Sauerstoff beim Brenn- und Kühlprozeß gewesen. Die Wahl dieses Ofens als Rekonstruktionsvorlage hätte aber nicht die gesamte Problematik des reduzierenden Brandes in einem freistehenden Töpferofen mit Lehmwandung erfaßt.

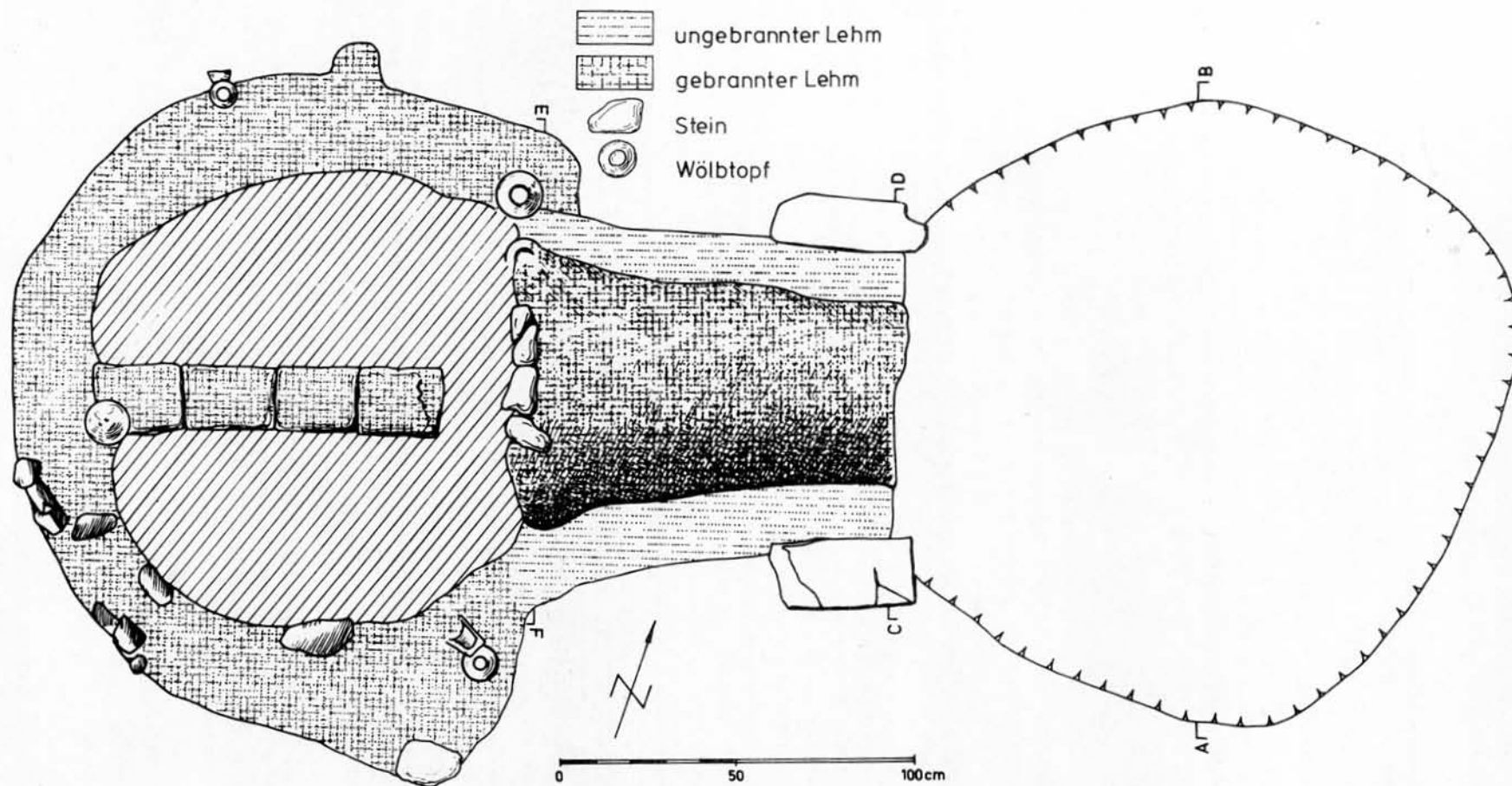


Abb. 4. Grundriß des Töpferofens III von Haarhausen.

Trotz der größeren Schwierigkeiten hinsichtlich der technischen Dichtigkeit wurde der Töpferofen III als Grundlage für die Rekonstruktion gewählt. Als Vorteile erwiesen sich hier der vollständiger Erhaltungszustand des Schürhalses und die dadurch bedingte sichere Basis für die größenmäßige Rekonstruktion sowie detaillierte Kenntnisse über das verwendete Material für den Wandungsbau des Ofens.

Der Töpferofen III liegt bei einer Orientierung nach Ost-West (mit einer Abweichung von 20° nach ONO-WSW quer vor den Öfen I und II. (Taf. I,1) Vollständig erhalten ist der Schürhals mit einer Gesamtlänge von 1,10 bis 1,15 m (Abb. 4) (Taf. I,2; II,1+2). Sein Grundriß hat eine konische Form, dessen lichte Weite sich von 0,40 m an der Schürhalsöffnung zu 0,85 bis 0,90 m am Übergang zum Feuerungsraum erweitert. Die lichte Höhe der Schürhalsöffnung mißt max. 0,40 m. Beide Seitenwangen weisen bis zu einer Höhe von 0,25 m ab Sohle steinharte Kanten auf, die in Festigkeit und Farbe der Bodensohle gleichen, also aus gebranntem Keuper bestehen. Ab dieser Höhe setzt die rotgebrannte Lehmwandung mit einer durchschnittlichen Stärke von 6 cm ein, die halbkreisförmig gewölbt ist (Abb. 5,1). Die Schicht rotgebrannten Lehms ist bei der Kanalerweiterung am Übergang zum Feuerungs-/ Brennraum 8 cm stark, an der höchsten Stelle der Wölbung sogar auf 12 cm angewachsen (Abb. 5,2; Taf. III,2).

Zu beiden Seiten des Schürhalses ist im Grabungsplanum und im Profil eine 0,15 - 0,20 m starke Schicht ungebrannten Lehms bis zu einer Höhe von 0,20 m feststellbar. Durch diese sicher der Stabilität des Schürhalses dienende Schicht, die aus anstehendem Erdreich besteht, wächst dessen Wandungstärke auf 0,25 bis 0,30 m an. Diese Stützschrift verläuft nur parallel zur senkrechten Wandung des Schürhalses, die eigentliche Wölbung wird von ihr nicht erfaßt. An der Schürhalsöffnung wird diese Schicht beidseitig von je einem großen Stein begrenzt, von denen jeder eine Länge von 0,40 m, eine Breite zwischen 0,15 bis 0,20 m und Stärke von 0,10 - 0,15 m aufweist. Sie sitzen im wesentlichen dieser Lehm-schicht auf bzw. sind nur gering in sie eingetieft. Das berechtigt zu der Schlußfolgerung, daß diese Steine dem Schutz der Schürhalsöffnung bzw. seiner Wandung dienten, die bei der Bedienung des Ofens größter mechanischer Belastung ausgesetzt wird. Sie markieren aber gleichzeitig die damalige Oberfläche.

Die Sohle des Schürhalses bildet in 0,75 m Tiefe der anstehende Keuper, der durch die Hitzeeinwirkung hart gebrannt ist. Diese Schicht reicht vor den Ofen etwa 0,50 m über die Schürhalsöffnung hinaus. Dieser Platz ist ein geschaffenes Arbeitsplateau vor dem Ofen, nicht - wie sonst bei Ofengruben - erheblich unter der Ofensohle eingetieft. Dieses Plateau wurde durch die anmoorige Schicht bis auf den Keuper eingetieft, seine Sohle liegt in 0,75 m Tiefe in einer Ebene mit der Ofensohle (Abb. 5,3). Die Form war - nach den geringen Möglichkeiten, in der anmoorigen Schicht eine Verfärbung zu erkennen - langoval-kreisförmig mit einer maximalen Breite von 1,60 m und einer maximalen Länge von 1,70 m. Die Füllung bestand vor allem aus Holzkohle, Lehmresten und Scherben. Holzkohle lag besonders in unmittelbarer Nähe der Schürhalsöffnung konzentriert.

Die sich westlich an den Schürhals anschließende Höhle (Feuerungsraum) war im Gegensatz zu den Befunden der Öfen I und II nicht durch konkrete Wandungsreste feststellbar. In 0,30 - 0,55 m Tiefe zeigte sich hier nur eine amorphe Ansammlung von vorgeformten Lehmgebilden, Lehm-Wandungsresten, Scherben, Holzkohle, Steinen, größeren Stellen gelben Sandes und mehreren Stellen mit Gefäßresten, die sich durch schwächeren Brand auszeichneten. (Taf. II,1,2; III,2)

Nach Entfernung dieser Versturzmasse konnte ab 0,61 m Tiefe ein massiver Steg (Taf. IV,1; V,2) freigelegt werden, der aus einzelnen Lehmziegeln aufgebaut war, deren Maße 0,10 m x 0,19 m x 0,22 m betragen. Die Oberkante des Steges ist treppenartig abgestuft: Die oberste Schicht bilden zwei Lehmziegel in der Mitte; der Ziegel am Ende des Steges liegt am

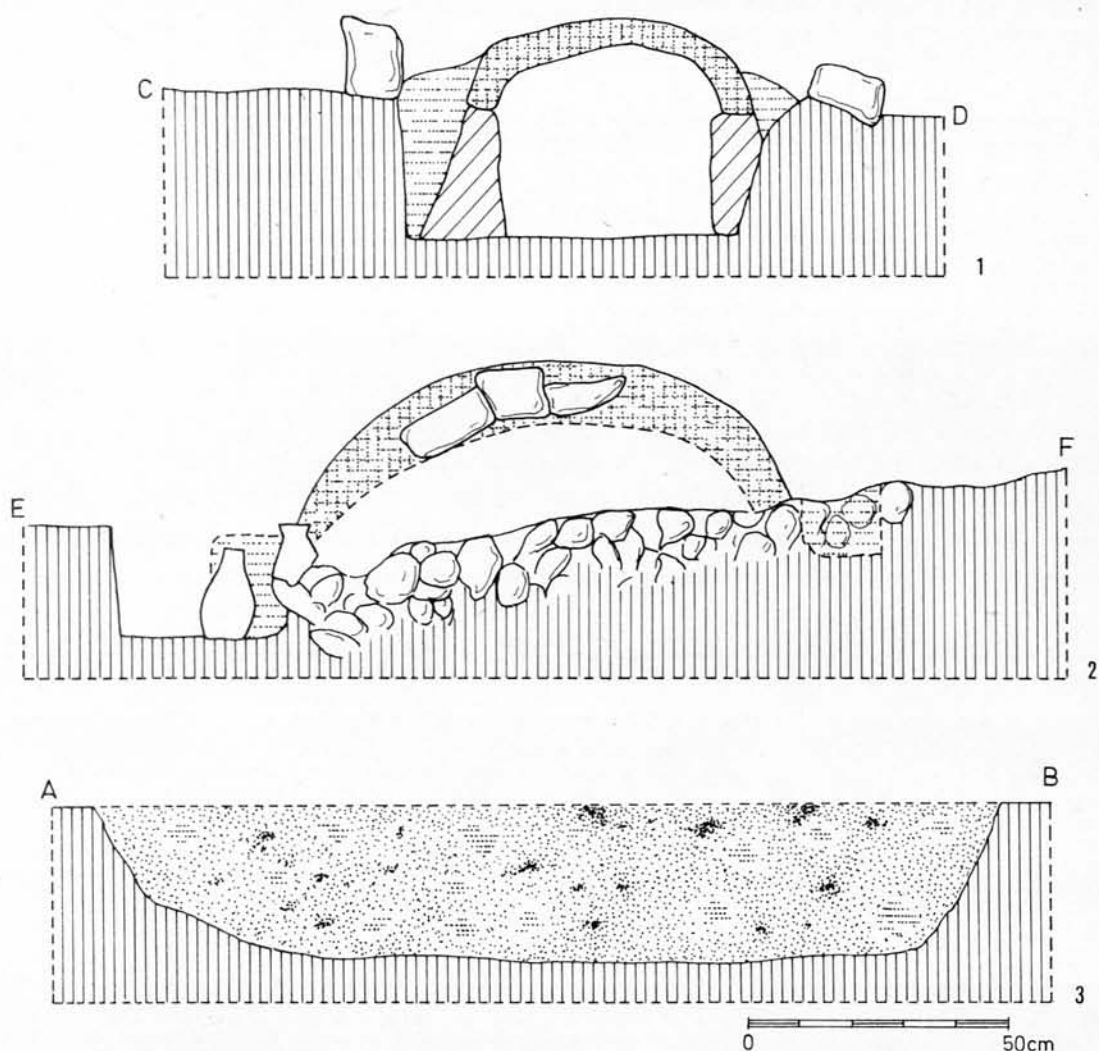


Abb. 5. Profilschnitte durch den Töpferofen III von Haarhausen
 1 durch die Schürhalsöffnung
 2 am Übergang von Schürhals zum Feuerungsraum
 3 Arbeitsplateau vor der Schürhalsöffnung

tiefsten (0,70 m tief); jener am Anfang des Stegs wurde in 0,63 m Tiefe sichtbar. Dieser 0,19 - 0,20 m breite Steg ist bis zu einer Höhe zwischen 0,12 - 0,21 m erhalten. Die mauerartig aufeinandergesetzten Lehmziegel sind durch einen Lehm-"Mörtel" verbunden und an den Längsseiten verschmiert. Die Verwendung von Häcksel zur Magerung ist nachweisbar.

Beiderseits des Stegs ist die Sohle der Hölle in 0,82 - 0,85 m Tiefe feststellbar. Sie wurde mit einer Mischung von Keuperletten und Sand ausgeschmiert, ist hart gebrannt und markiert eine Fläche von 1,10 m x 1,25 m innerer Ausdehnung. Die äußere Begrenzung dieser Fläche bilden Wandungsreste, die eine Breite von 0,25 - 0,30 m ergaben. Sie bestehen aus rotgebranntem Lehm, gemischt mit Steinen, vorgeformten, genormten Lehmziegeln (Taf. V, 3) und Gefäßresten, die in der Wandungsmasse eingebacken waren. Ein Befund an der linken Anschlußstelle der Wandung an den Schürhals, bei dem ein situlaartiges Gefäß auf der Mündung stehend in situ vorgefunden wurde (Taf. IV, 2), spricht eindeutig für die Verwendung von Keramik für den Aufbau der Wandung, deren Reste bis in Tiefen von 0,70 - 0,82 m nachweisbar waren (Taf. V, 1). Reste einer Lochtenne waren trotz des vollständig erhaltenen Schürhalses nicht überliefert.

Die Ofen- und Schürhalssohle hat auf der Gesamtlänge von 2,50 m ein Gefälle um 12 - 16° von der Schürhalsöffnung zur Sohle der Hölle. Dieser Töpferofen war nur im unteren Teil des Schürhalses und der Hölle von Erdreich umgeben, d. h. eingetieft. Die Humusoberkante lag zur Zeit der Anlage und Benutzung des Ofens und der umliegenden Objekte etwa 0,50 - 0,55 m unter der heutigen Humusoberkante. Diese Daten ergeben sich am Schürhals selbst durch die Tiefe der parallel zu seiner gesamten Länge verlaufenden Schicht ungebrannten Lehms, mit dessen Oberkante in 0,50 bzw. 0,55 m Tiefe die Lage der die Schürhalsöffnung begrenzenden Steine korrespondiert. Das bedeutet, daß der Schürhals bis zur Hälfte seiner Gesamthöhe in die damalige Oberfläche eingetieft war; gleiche Feststellungen gelten auch für die Hölle.

Den Beobachtungen aus der Bauart des Töpferofens entsprechen Situationen der Objekte in unmittelbarer Nähe des Ofens. Die Herdstelle 2 westlich des Ofens liegt mit ihrer untersten Schicht ebenfalls auf dieser Höhe. Die südlich vor dem Ofen nachgewiesenen Pfostenverkeilungen, die gleichermaßen als Kriterium für die ehemalige Oberkante des Humus angesehen werden dürfen, treten in gleicher Schicht und Tiefe auf.

Der Töpferofen war ab obere Hälfte des Schürhalses und der Hölle mit dem gesamten Brennraum freistehend errichtet worden.

Sichere Aussagen über das Material und die Technik des Wandungsaufbaus vom Feuerungs- und Brennraum ermöglichen die in der Füllmasse geborgenen Ziegel. Für ihre Herstellung benutzte man mit Häcksel gemischten Lehm. Sie fanden sich besonders konzentriert in der hinteren linken Hälfte der Hölle in konzentrischer Anordnung (Taf. V, 3). Trotz der mit amorpher Lehmmasse bedeckten Formen lassen sich wiederkehrende Maße feststellen:

Format 1 Br: 9 H: 3 cm L: unbekannt (Abb. 6, 1-3)

Format 2 Br: 9 - 9,2 H: 2,5 cm L: unbekannt (Abb. 6, 4)

Format 3 Br: 9 - 9,2 H: 3 cm L: unbekannt. Die Schmalseite steht im Winkel von 85° zur Grundfläche, ist also abgeschrägt (Abb. 6, 5-6).

Format 4 Br: 11 bzw. 13 H: unbekannt L: unbekannt. Form eines Pyramidenstumpfes. Seitenflächen bilden zur Grundfläche einen Winkel von 82°.

Alle diese luftgetrockneten und vorgeformten Lehmstücke sind Baumaterialien in der Funktion von Ziegeln, die mit Sicherheit für den Wandungsbau im untersten Bereich des Ofens benutzt wurden. Da alle überlieferten Ziegel eine glatte und eine mit amorpher Lehmmasse besetzte Seite haben, darf der Schluß gezogen werden, daß sie an der Außen-, respektive auch an der Innenseite der Ofenwandung eingebaut wurden, während die Zwischenschicht gestampfter Lehm bildete. Im oberen Teil der Feuerungs-/Brennraumwandung scheinen als Baumaterial nur Wölbtopfe benutzt worden zu sein. Lehmreste mit Negativabdrücken von eingebauten Gefäßen sind an der Gegenseite immer gerundet, damit weisen sie sich als Teile der Außenwandung aus. Die Verwendung von Lehmziegeln ist an diesen Stellen daher auszuschließen.

Der Einsatz von Gefäßen¹, sogenannten Wölbtopfen, als Baukeramik für die Errichtung der Wandung ist durch mehrere Indizien belegbar:

- a) In-situ-Befunde beweisen den Einbau dieser Gefäße auf der Mündung stehend in der Wandung vom Feuerungs-, besonders aber vom Brennraum (Taf. IV, 2). Das vollständig und in situ erhaltene Gefäß ist situlaähnlich, dickwandig, Drehscheibenarbeit, grauer Kern mit reoxydierter lederfarbener Oberfläche. Die Größen der rekonstruierbaren Wölbtopfe schwanken zwischen 16 und 19 cm Höhe und 14 bis 16 cm Dm.
- b) Reste gleicher Gefäße fanden sich z. T. noch ineinander stehend zwischen der Versturzmasse (Taf. V, 1). Daß es sich dabei nicht um die Ofenfüllung handelt, ergibt sich aus der Beobachtung, daß sich hier neben verschiedenen anderen Scherben nur der Typ des Wölbtopfs mehrfach nachweisen läßt.
- c) Unter den rekonstruierbaren Gefäßformen ist nur der Typ des Wölbtopfs in mehreren Exemplaren vertreten, die übrigen keramischen Reste sind - da es sich vorwiegend um

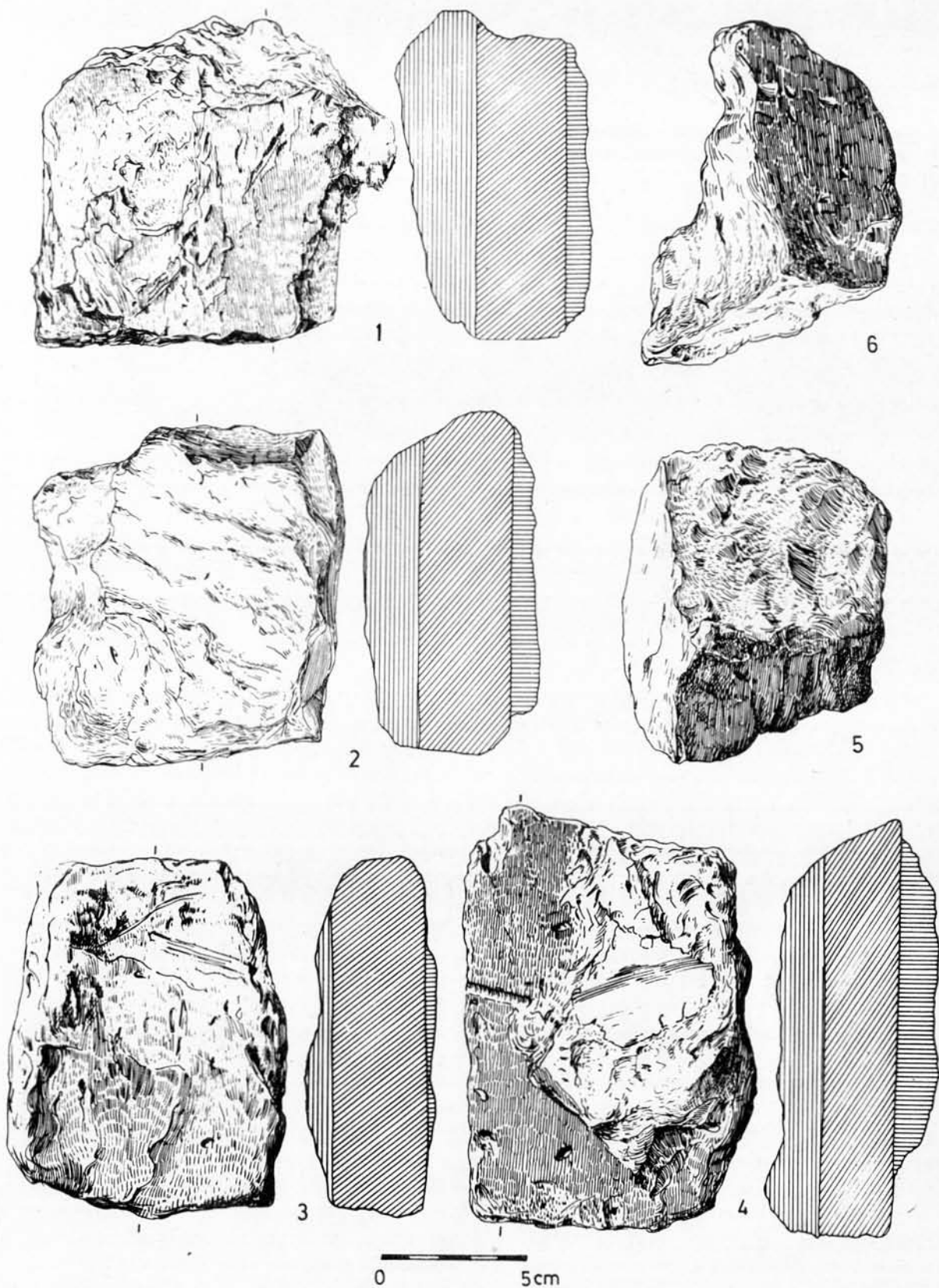


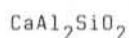
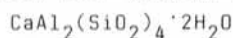
Abb. 6. Luftgetrocknete Lehmziegel aus Töpferofen III

zerscherbtes Einsetzgut (also Töpferabfall) handelt - nur selten rekonstruierbar. Das quantitative Überwiegen des Wölbtopfs legt seine häufigere Verwendung nahe.

- d) Die nachweislichen Wölbtopfe sind weniger sorgfältig gearbeitet als die hier hergestellte Gebrauchskeramik. Die Böden sind nicht abgedreht, so daß keine scharfen Kanten am Bodenrand entstehen, sondern die Böden unregelmäßig auslaufend enden. Im Inneren des Gefäßes sind die Schlickereste nicht entfernt worden, sondern noch als kegelförmige Unebenheiten am Boden oder am Unterteil der inneren Wandung enthalten (Abb. 7, 1-4).
- e) Für die Verwendung dieser Gefäße als Baukeramik wurden sie mit horizontalen Rillen in der Funktion von Haftrillen versehen. Reste vom Einbau dieser Keramik in der Lehmwandung stellen Lehmanhaftungen auf der Wandung der Gefäße dar.
- f) Unter den als Wölbtopfen erkannten Gefäßen und Scherben ist ein großer Teil nur sehr schlecht gebrannt; sie sind als Schwachbrand zu klassifizieren.
- g) Außer den überlieferten Wölbtopfen wird der Einbau dieser Keramik in die Wandung des Ofens durch mehrere Lehmreste bewiesen, die Negativabdrücke von zwei übereinandergestülpten Gefäßen mit den Abformungen der Haftrillen aufweisen. Diese Lehmstücke haben z. T. Dreiecksform, da sie die Zwischenräume zwischen je zwei übereinander und nebeneinander angeordneten Wölbtopfen ausfüllen. Die dabei ermittelten Stärken der aufgetragenen Wandung schwanken zwischen 0,5 und 5 cm. Diese Wandungsreste enthalten einen stark kalkhaltigen Überzug (Abb. 8, 1-4).

Die Außenseiten einiger hier beschriebener Lehmabdrücke sind gerundet, die sich ergebende Krümmung von 35° ist für die Kuppelwölbung von Relevanz.

Der stark kalkhaltige Mörtel auf der Außenseite der Lehmabdrücke ist von unterschiedlicher Stärke; diese schwankt zwischen 0,5 cm und 1,4 cm; an einigen Lehmresten ist sie auch nur 1 bis 2 mm stark. Beachtenswert sind deutliche Fingerspuren in dieser Kalkmasse. Nachweisbar ist der Kalkmörtel auch auf den vorgefertigten Lehmziegeln. Die an mehreren Proben nachweisbare Abfolge von Häcksellehm, Ziegel und anschließendem Kalkmörtel ist ein deutlicher Beleg für das Überstreichen der äußeren Ofenwandung mit diesem Mörtel. Die gleiche Abfolge ist an den Abdrücken mit Negativen der Wölbtopfe festzustellen, deren äußerste Schicht ebenfalls der Kalkverstrich bildet. Ein Röntgendiffraktogramm und eine chemische Analyse des Mörtels ergab²: "Das Bindemittel enthält ca. 2,9 % CO₂ - umgerechnet 6,6 % CaCO₃, ca. 10 % Quarz, 10 % Plagioklas, ca. 20 % Illit/Glimmer und als Hauptbestandteile ein Gemisch aus Ca-Alumosilikaten:



Diese Zusammensetzung gestattet die Schlußfolgerung, daß es sich um ein Bindemittel handelt, welches aus einem stark kalkhaltigen Mergel durch Brennen bei 700 - 900 °C hergestellt und in Verbindung mit Wasser und CO₂ ausgehärtet wurde. Aus der Römerzeit sind derartige Bindemittel unter dem Begriff 'ROMANKALK' bekannt."

Zwischen der Einsturzschiicht der Ofenwandung, in stärkerem Maße aber auf dem Arbeitsplateau - dort als große Konzentration vorhanden - wurde Holzkohle geborgen, die die zum Feuern benutzten Holzarten erkennen läßt. Die Ergebnisse der Bestimmungen der Holzkohle dieses Ofens ergab:³ "Den größten Anteil hat die Buche. Alle Stücke waren von starkem Stammholz; die Krümmung der Jahrringe ist ganz minimal. Es müssen also starke, alte Bäume verwendet worden sein ... Insgesamt wurden 699 Stücke bestimmt, davon entfallen auf

Buche	649	92,8 %	Feldahorn	4
Eiche	24	3,4 %	Bergahorn	2
Hainbuche	13		Ulme	2
Vogelbeere	4		Kirsche	1 "

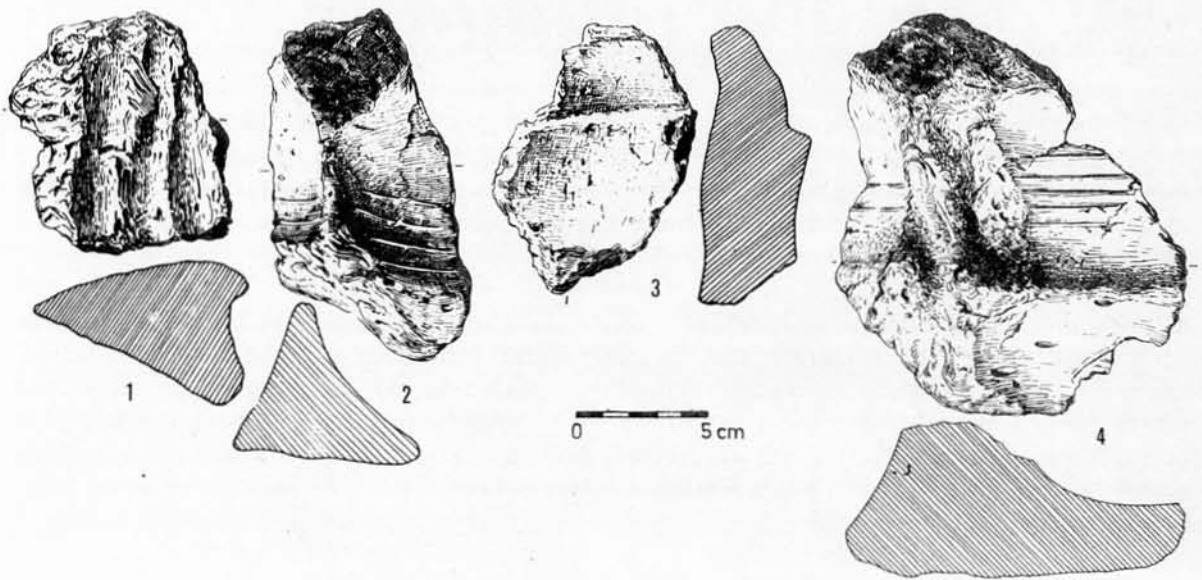


Abb. 7. Wölbtopfe aus Töpferofen III

Abb. 8. Lehmwandungsreste mit Negativabdrücken von Wölbtopfen, Töpferofen III

1.3. Fundmaterial

Das Gros des aus dem Ofen direkt oder aus dem unmittelbaren Umfeld des Ofens geborgenen Fundmaterials stellen Keramikreste dar, die fast ausschließlich auf der Drehscheibe hergestellt waren. Die archäologisch-formenkundliche Auswertung wird in einer späteren Arbeit erscheinen⁴; hier sollen nur die für die Rekonstruktion des Herstellungsprozesses relevanten Merkmale betrachtet werden. Es sind dies Angaben über Stärke, Farbe, Struktur und Erhärtung der Scherben. Danach ist das Material in sieben Gruppen zu gliedern:

- A Der Scherben ist sowohl im Bruch als auch auf der Oberfläche durchweg grau. Scherben dieser Gruppe weisen überwiegend Wandungsstärken $> 0,6$ cm bis 1,2 cm auf; ein kleinerer Teil ist dünnwandig mit Wandungsstärken $< 0,6$ cm. Zur Gruppe der durchweg grauen Keramik mit Wandungsstärken $> 0,6$ cm sind auch die Scherben mit deutlichen Belegen für Aufblähungen, Versinterung und schichtartiges Springen der Wandung durch Überhitzung zu rechnen. Die Wasseraufnahmefähigkeit (WAF) dieser Scherbengruppe liegt bei einem statistischen Mittelwert (\bar{x}) von 12,7 %.⁵
- B Der Scherben zeigt eine grau-braune Oberfläche, der Kern ist häufig grau. Analog zu denen der Gruppe A tritt diese Modifikation bei dünnwandigen ($< 0,6$ cm) und dickwandigen ($> 0,6$ bis 1,2 cm) Scherben auf. WAF bei $\bar{x} = 8,8$ %.
- C Scherben mit lederfarbener Oberfläche, der Kern zeigt im Bruch häufig graue Färbung. Die Stärke der Oberflächenfärbung sowie die Übergänge zum Kern variieren stark. Nach der Wandungsstärke ist eine Trennung in dünn- und dickwandige Keramik dieser Gruppe möglich. WAF bei $\bar{x} = 11,3$ %.
- D Scherben mit sepia-farbener Oberfläche (violett-braun), deren Kern oft rötlich-braun gefärbt ist. Keramik dieser Gruppe weist Merkmale von Schwachbrand auf. In der Stärke entspricht sie der Gruppen A - D. WAF bei $\bar{x} = 11,7$ %.
- E Scherbenoberfläche ist ziegelfarben, die Oxydationsschicht geht in den meisten Fällen bis zum Kern des Scherben durch. Diese Gruppe ist durch dünn- und dickwandige Scherben vertreten. WAF bei $\bar{x} = 11,2$ %.
- F Scherben mit grauem Kern und schwarzer Engobe. Trennung der Schichten ist scharf. Eine Gliederung der Scherben in dünnwandige ($< 0,5$ cm) und dickwandige ($> 0,5$ cm) ist feststellbar, wenngleich besonders bei dieser Gruppe der Wechsel der Wandungsstärke von 1,4 cm am Boden bis zu 0,4 cm Wandungsstärke oberhalb des Umbruchs an zusammenhängenden Gefäßresten deutlich erkennbar ist. WAF bei $\bar{x} = 9,4$ %.
- G Scherben durchgehend schwarzer Färbung mit schwarzer Engobe. Neben dünnwandigen Exemplaren ist diese Gruppe auch durch auffallend dickwandige (bis zu 2 cm) vertreten. WAF bei $\bar{x} = 10,4$ %.

In der Häufigkeitsverteilung überwiegen die Scherben der Gruppe A mit deutlicher Dominanz der dickwandigen Keramik. Relativ häufig ist die graubraune Keramik (Gruppe B) vertreten, auch hier überwiegen die dickwandigen Scherben. Scherben von lederfarbener Oberfläche (Gruppe C) treten in der Häufigkeit hinter den Gruppen A und B zurück, die Gruppen D bis G sind zu den schwächer vertretenen zu rechnen.

Mit Ausnahme der Gruppe D zeichnet sich die hier phänomenologisch beschriebene Keramik durch einen klingendharten Brand aus. Von geringerer Brennqualität sind außer den Scherben der Gruppe D fast alle Reste von Wölbtopfen, die schon bei der Freilegung durch ihre weiche Oberfläche auffielen und auch in der Oberflächenfärbung mit Mehrheit der Gruppe D (sepiafarbene Scherbenoberfläche) zuzuordnen sind. Die Wölbtopfe sind - da sie keine Produkte im Sinne der üblichen Gebrauchskeramik darstellen - bei der oben vorgelegten Analyse nicht erfaßt.

Die hohen Al_2O_3 -Gehalte von durchschnittlich 20 Masse-% bei Schwankungen zwischen 12 - 30 Masse-%, die hohen Fe_2O_3 -Gehalte von durchschnittlich 6 Masse-% bei Schwankungen zwischen 4,2 und 7,4 Masse-% sowie die wechselnden Mengen an organischen Bestandteilen und

erkennbaren groben Sandzugaben deuten auf selektierten und aufbereiteten Rohstoff⁵.

Soweit Gefäße rekonstruiert werden konnten, handelt es sich um den Typ des bauchigen Kruges (von max. 3 l Kapazität), des Vorratsgefäßes (von max. \approx 12 l Kapazität) und der kleinen Schale (mit max. \approx 1,5 l Kapazität).

1.4. Chronologische und kulturell-ethnische Zuordnung des Fundplatzes

Die Grobdatierung des Töpfereizentrums in Haarhausen basiert auf mehreren Argumenten und Fundkomplexen:

- a) Die bisher in Thüringen bekannte Drehscheibenkeramik ist durch ihr Vorkommen im Fürstengrab von Haßleben (Grab 8) per analogiam in das ausgehende 3. Jh. - um 300 - datiert. Diese Datierung stützt sich sowohl auf Formen- und Stilvergleiche des hier enthaltenen reichen Fundmaterials als auch auf die Datierung durch römische Münzen (Schulz 1933; Behm-Blancke 1973, S. 29; Schmidt 1982a, Bl. 11).
- b) In Haarhausen wurden auf der Grabungsfläche um die Öfen mehrere chronologisch signifikante Gegenstände geborgen, wie Fibeln mit umgeschlagenem Fuß, Elbfibeln, Fibeln mit trapezförmigem Fuß und Knochenkämmen mit halbrunder Kopfplatte. Sie gelten als typisch für die 2. Hälfte des 3. Jh. mit Übergang zum 4. Jh. u. Z. (Eggers 1955, S. 202; Thomas 1960, S. 77; Leube/Meyer/Vogt 1972, K₁₋₉).
- c) Für Haarhausen liegt eine ¹⁴C-Analyse⁶ vor, die die oben angeführten Argumente einer Datierung der Drehscheibentöpferei von Haarhausen in das ausgehende 3. Jh. bzw. um 300 gänzlich stützt.

Wenngleich im Siedlungsgebiet germanischer Stämme, speziell der Hermunduren/Thüringer (Schmidt 1982b, S. 154), gelegen, überwiegen auf dieser Produktionsstätte die Merkmale provincialrömischer Kultur. Dazu sind in erster Linie die Töpferöfen selbst mit ihren Volumina, ihrer oberirdischen Bauweise, ihren wesentlichen Konstruktionsmerkmalen (Benutzung von Lehmziegeln und Wölbtöpfen als Baumaterial, Muffeleinrichtung) und die Produkte und deren Technologie (Benutzung der Drehscheibe, Formung der Gefäße nach Formkriterien des provincial-römischen Gebiets) zu nennen. Aus dem Rahmen des Entwicklungsstandes der Produktivkräfte in der Keramikherstellung bei den germanischen Stämmen fällt auch der in Haarhausen nachweisbare Produktionsumfang vom Charakter früher Warenproduktion (Dušek 1985, S. 289; 1984, S. 13).

Beim jetzigen Stand der Erforschung des Keramik-Produktionsplatzes von Haarhausen, aber auch der Keramikproduktion in Thüringen im 3. - 4. Jh. kann vorerst mit Sicherheit konstatiert werden, daß sich hier im "Barbaricum", in nächster Nachbarschaft zum provincial-römischen Gebiet eine Keramikproduktion in römischer Technologie und nach römischem Geschmack entwickelte und blühte.

Zur Ethnizität der Träger dieser Produktion und der Entscheidung, ob es sich dabei um von den Römern angelernte Germanen oder um aus dem Imperium stammende römische Handwerker handelt, häufen sich im archäologischen Befund Anzeichen, die den direkten Einsatz provincial-römischer Töpfer wahrscheinlich machen (Dušek 1984, S. 14).

1.5. Parallelbefunde zum Töpferofen

Für den rekonstruierten Nachbau eines Töpferofens zum Zwecke der Versuchsbrände müssen als Ergänzung einiger, an unserem Ofen fehlender Detailbefunde (Stärke der Lochtenne, Größe der Durchlässe, Höhe des Brennraumes, Frage der Einsetz- u. Abzugsöffnung) Erkenntnisse weiterer archäologischer Töpferöfen bzw. Nachbauten, aber auch rezenter einfacher Töpferöfen ausgewertet werden.

Zeitgleiche Töpferöfen sind in Thüringen und dem Mittelgebirgsgebiet nicht bekannt; alle bisher untersuchten Töpferöfen gehören ausschließlich der Latènezeit an. Sie sind der Gruppe der eingetieften Ofentypen zuzuweisen, deren Kuppelwandungen ebenfalls Häcksel-Lehm aufweisen bzw. damit verschmiert waren.

Die eingetiefte Lage der latènezeitlichen Töpferöfen von Gotha-Fischhaus (Kaufmann 1962/63, S. 438 ff.), Niederroßla (Schirmer 1941, S. 23 ff.) und Ermlitz (Toepfer 1953, S. 273) begünstigt den Nachweis von Lochtennen mit Stärken von 14, 9 oder 5 cm. Diese Fakten liefern für die Rekonstruktion der Lochtenne des Haarhäuser Ofens keine sicheren Anhaltspunkte, da die Korrelationen zwischen dem Durchmesser der Hölle, der Höhe des Steges und der Stärke der Lochtenne unbekannt ist. Außerdem ist für die Öfen von Niederroßla und Gotha infolge der niedrigen Hölle und der geringen Höhe des Schürhalses (etwa 20 cm) nach Faßhauer (1959, S. 276) eine Befehuerung der Öfen ausschließlich von der Ofengrube aus plausibel, d. h. nur die Heißluft und Gase zögen durch den Schürhals in das Ofeninnere, was eine thermische Entlastung der Lochtenne bedeuten könnte. Mit dieser Feuerführung steht auch jenes Konstruktionselement des Gothaer Töpferofens, nämlich das leichte Ansteigen der Ofensohle von der Schürhalsöffnung zur Hölle, in kausalem Zusammenhang, da es der Zirkulation der Heißluft äußerst förderlich war. Dagegen weist die Sohle des Ofens III von Haarhausen ein Gefälle in umgekehrter Richtung auf.

Nicht applizierbar auf die Rekonstruktion des Haarhäuser Ofens sind die für die Öfen von Niederroßla (Schirmer 1941, S. 26) und Ermlitz (Faßhauer 1959, S. 249) empirisch ermittelten Größen der Kuppelöffnungen von 50 oder 60 cm Dm, da hierfür die größten Durchmesser der Gefäße Entscheidungshilfen waren. Diese großen Kuppelöffnungen sind aber eine spezifische Eigenart eingetiefter Töpferöfen.

Beachtenswert ist die bei den Töpferöfen der vorrömischen Eisenzeit von Falkensee (Behm 1941, S. 216 ff.) nachgewiesene stark kalkhaltige hell- bis weißgraue Schicht. Diese Schicht, deren Funktion der Ausgräber mit dem Schutz vor Zerreißen oder mit der Wärmeisolierung in Zusammenhang bringt, war bei den Falkenseer Öfen an der Innenseite der Brennraumwandung nachweisbar. Das mag mit der abweichenden Konstruktion besonders des Töpferofens I von Falkensee in Zusammenhang stehen.

In Haarhausen dagegen war die Verschmierung der Außenwand mit Kalkmörtel in erster Linie eine Maßnahme zum Schutz des Brenngutes vor Falschluff bei auftretenden Rissen in der Wandung.

Die fünf bisher auf dem Territorium der DDR bekannten Töpferöfen der Mittel- bis Spätlatènezeit sind in der Konstruktion von der der Haarhäuser Öfen insgesamt stark abweichend.

Naheliegend ist ein Vergleich der Haarhäuser Töpferöfen mit der Konstruktion der insgesamt 99 untersuchten Töpferöfen in den Produktionszentren für "graue Keramik" bei Kraków-Nowa Huta und Igołomia, alle auf der Weichselterrasse gelegen (Buratynski 1976, S. 89). Handelt es sich hier wie auch in Haarhausen um die Herstellung grauer Drehscheibenkeramik, so bestehen in der Konstruktion der Öfen doch tiefgreifende Unterschiede, denn die in Klempolen untersuchten, schon von Reyman (1935, S. 163) als Typ von Tropiszów bezeichneten Töpferöfen sind eingetieft Anlagen; Brenn- und Feuerungsraum, aber auch Schürhals und Ofengrube sind in den Löß eingegraben worden. Die Innenwände waren mit Lehm verschmiert. Die Stege reichen mit Ausnahme des Ofens 6 von Zofipole bis in den Schürhals hinein (Żaki 1949, S. 345 ff.). Die Möglichkeit des Aufbaus der Kuppel durch ein Korbgeflecht mit Lehmausschmierung erwägt Gajewski (1959, S. 112) außer dem Typ mit in den anstehenden Löß eingegrabener Kuppel. Bei einem Durchmesser von durchschnittlich 1,50 m dürften sie hinsichtlich der Kapazität dem Haarhäuser Ofen III etwa gleich sein.

Handelt es sich also bei den kleinpolnischen Töpferöfen für die graue Drehscheibenkeramik des 3. und 4. Jh. um Typen mit waagerechter Lochtenne, senkrechtem Ofenzug und Zwei-Kammerfeuerung - soweit sind sie mit den Haarhäusern identisch - so muß die Technologie des Ofenbaus doch als sehr different betrachtet werden (eingetieft Anlage, Lehmwandung, zweiteiliger Schürhals).

Zeitgleiche Töpferöfen in Schlesien zeigen eine größere typologische Streuung. Außer den Einkammeröfen vom Meiler-Typ, deren Wände mit Steinen ausgelegt sind, wie z. B. Pawłow, Kr. Brzeg (Pazda 1966, S. 78 ff.) oder Wrocław-Karłowice (Trudzik 1971, S. 163 ff.) ist in Radłowice, Kr. Olawa, ein zweiteiliger Kuppelofen freigelegt worden, dessen Kuppel vom Ausgräber als über dem Niveau stehend und von außen mit Erde angeworfen angesehen wurde (Pazda 1974, S. 272). Der von Kramarkowa (1967, S. 162) in Radwanice, Kr. Wrocław, untersuchte Töpferofen ist durch seine sehr dünne Wandung als eingetiefter Typ zu deuten. Da zu seinem Wandungsaufbau teilweise auch Steine benutzt wurden, sieht Pazda (1976, S. 173) darin eine Übergangsform zwischen den Einkammeröfen der späten Latènezeit und den Zweikammeröfen mit Lochtenne, der als typisch für die Produktion von grauer Drehscheibenkeramik in Schlesien und Kleinpolen gilt. Angaben über die Höhe dieser Öfen liegen auch hier nicht vor; der Abschluß der Kuppel ist nie erhalten.

Die wenigen in Böhmen untersuchten Töpferöfen gehören vorwiegend der Latènezeit an, wie Praha-Bubeneč (Novotný 1952, S. 276), Lovosice, Kolín oder Brčekoly (Princ-Skružný 1977, S. 165 ff.). Sie sind in der Konstruktion sehr different. Der der jüngeren Kaiserzeit zuzuordnende Ofen von Mutejovice, Kr. Rakovník, (Friedrich 1964, S. 589 ff.) ist lediglich durch eine Lochtenne von nur (!) 2 bis 3 cm Stärke und Pfeifen von 5 cm Dm nachgewiesen.

Zum progressiven zweiteiligen Typ von Töpferöfen müssen die in Jiřikovice, Kr. Brno-Land, (Pernička 1970, S. 78) freigelegten sieben Öfen für die Herstellung grauer Drehscheibenkeramik gerechnet werden, jedoch sind Details des Ofenbaus nicht überliefert; gleiches gilt für den von Ludikovský (1960, S. 68) im gleichen Ort untersuchten Ofen sowie die Öfen von Chrlice bei Brno (Pernička 1968, S. 59), Opava-Krnov (Šikulová 1971, S. 76) oder Holasovice bei Opava (Šikulová 1978, S. 52). Zu den eingetieften Typen ist der Ofen von Luleč, Kr. Vyškov, zu rechnen. Sein ganz erhaltener Schürhals mit einer Öffnung von 50 x 80 cm ging, durch eine Stufe abgesetzt, in den Brennraum über; Reste des Rostes fehlen (Peškař 1975, S. 40).

Für einen Vergleich zur Ergänzung der Rekonstruktion bieten auch die aus der Slowakei bekannten Töpferöfen keine verwendbaren Daten. Sowohl die spätlatènezeitlichen Öfen, wie Bratislava (Janšák 1955, S. 200) und Prešov (Blahuta 1963, S. 160), als auch die der älteren Kaiserzeit, wie Šebastovce (Lamiová-Schmiedlová 1962, S. 809) oder Beluša (Pieta 1974, S. 94), sind im wesentlichen eingetieft Objekte. Selbst die Töpferöfen der römischen Station von Pác-Cífer (Kolník 1976, S. 134 ff.) gehören zum Typ der eingetieften Öfen.

Aus dem germanischen Siedlungsraum liegen für die Öfen von Haarhausen keine vergleichbaren Befunde vor. Wohl aber bieten sich Übereinstimmungen zu den Töpferöfen im provinzialrömischen Gebiet. Es betrifft dies sowohl die freistehende Konstruktion des Brennraumes als auch die Wahl von Lehmziegeln und Wölbtopfen als Baumaterial. Auch hinsichtlich der Dimensionen gibt es weitgehende Übereinstimmungen.

Als räumlich und morphologisch sehr nahe Parallele soll der Töpferofen 4b von Heddernheim angeführt werden, der bei fast gleicher Kapazität einen runden Grundriß aufweist. Für den Bau der Wandung wurden auch hier Wölbtopfe, für den Steg Lehmziegel benutzt. Erweitert wird durch diesen übereinstimmenden Befund die Erkenntnis über die Anlage einer

Einsetzöffnung, die sich hier 35 cm über dem Schürhals befand und eine Breite von 50 cm hatte. Auch der rechteckige Töpferofen 4a von Heddernheim weist über dem Schürhals eine 60 cm breite Einsetzöffnung auf (Thomas 1984, S. 15 ff.). Für die römischen Töpferöfen von Welzheim (Bersu/Goessler/Paret 1917, S. 130), Remagen (Funck 1910, S. 324), Mainz-Kastel (Winter 1957, S. 483 ff.) oder von Speicher sind ebenfalls Wölbtopfe als Baumaterial überliefert, vom letzten auch wiederum der Nachweis einer Einsetzöffnung (Loeschke 1922, S. 3 f.).

Auch für Brennraumdurchmesser um/über 2,00 m finden sich Parallelen in diesem Gebiet, wie Waiblingen (Paret 1938, S. 58 ff.), Trier (Huld-Zetsche 1972, Beil. 1), Heidelberg (Heukemes 1964, S. 12, Beil. 1) oder Rheinzabern (Rau 1977, S. 62; Reutti 1983, S. 48).

Als Baukeramik wurden in Rheinzabern, z. B. beim Ofen der Fundstelle XIX, Tonröhren von 22 cm Länge und 12 cm Durchmesser übereinanderstehend und mit Lehm verstrichen eingebaut (Ludowici 1908, S. 143).

Ergänzende Befunde für die Rekonstruktion des Haarhäuser Ofens, besonders hinsichtlich der Benutzung von Wölbtopfen stehen daher aus dem provinzial-römischen Gebiet und aus Italien, z. B. aus Pompeji, zur Verfügung.

Die in Haarhausen untersuchten Töpferöfen sind der erste Nachweis von Töpferöfen im Barbaricum der Elb- und Rheinwesergermanen. Da sowohl diese technischen Anlagen in allen Konstruktionsdetails als auch die Produkte (Drehscheibenkeramik) mit provinzialrömischen Vorlagen übereinstimmen, belegen sie Technologietransfer im 3. Jh. aus dem provinzialrömischen ins germanische Gebiet.

2. KERAMISCHE BRENNTECHNIK

Die Beantwortung der Frage, wie mit dem gefundenen Ofen gebrannt wurde, führt zu der Aufgabe, aus der Vielfalt der keramischen Brennmöglichkeiten die herauszusuchen, die größtmöglich mit dem Befund übereinstimmt. Diese Vielfalt ergibt sich aus der Tatsache, daß der keramische Brand beeinflusst werden kann durch die Höhe der Brenntemperatur, durch den Charakter der Gasatmosphäre über dem Brenngut und durch die Zeit der Temperatureinwirkung, insbesondere während des Garbrandes. Zusätzlich bringt jeder Rohstoff durch seine chemische und mineralogische Zusammensetzung und seine mechanische und thermische Vergangenheit infolge der dem Brennen vorgelagerten Verfahrensstufen - Aufbereitung, Formgebung, Trocknung - spezifische Besonderheiten in den Brennprozeß ein.

Immer wieder strittig ist in der archäologischen Forschung die Zuordnung von Brenntemperatur und brenntechnischer Funktion historischer Öfen. Brenntemperaturen < 800 °C führen mit bislang bekannten Brennverfahren zu keramischem Schwachbrand; Brenntemperaturen > 800 °C sind dagegen in vielen historischen keramischen Öfen brenntechnisch nur schwer erreichbar. Es ist schwierig und oft auch grundsätzlich nicht möglich, aus chemischen und mineralogischen Analysen keramischer Fundstücke auf die Brenntemperatur und daraus wieder auf Brenntechnik und Ofenbau zu schließen. Eine neuere Aufarbeitung dieser Problematik stammt von Letsch/Noll (1983, S. 259 ff.). Es lag daher nahe, das in der DDR entwickelte Hydritverfahren zum Brennen bau- und grobkeramischer Erzeugnisse bei niedrigen Temperaturen von 700 °C bis 800 °C zur Deutung des archäologischen Befundes und zur experimentellen Nachweisführung heranzuziehen.

2.1. Brenntechnische Einordnung der Fundkeramik und Öfen

Es ist auffallend, daß zum Merkmal Farbe äußerlich kein einheitlicher Qualitätseindruck entsteht. Die im gefundenen Scherbenmaterial bestimmten Eisengehalte liegen mit 6 Masse-%

Fe_2O_3 sehr hoch. Nach Houseman-Koenig (1971, S. 75) ist bei den meisten niedrigbrennenden Tonen das Eisenoxid das primäre Farbmittel. Der Schlüssel zur Farbentwicklung ist die Regelung des Oxydationszustandes und des physikalischen oder mineralogischen Zustandes des Eisens im gebrannten Scherben, z. B. ob Eisen in einer Glasphase vorhanden ist, als freies Oxid oder in einer komplexen Kristallphase vorliegt. Bei Kohlenstoff im Ton ist zu beachten, daß Wasserdampf als Oxydationsmittel wirkt. Wasserdampf in der Gasphase führt über die Wassergasreaktion, auch bei Abwesenheit von Sauerstoff, zum schnellen Abbau eingelagerten Kohlenstoffs. Bei Bimson (1978/79, S. 5) finden sich ebenfalls Hinweise über den Einfluß des Wasserdampfes in der Brennatmosphäre auf die Färbung des gebrannten Scherbens aus eisenhaltigen Tonen. Danach erfolgt bei Gegenwart von Wasserdampf die Reduktion zu grau bzw. schwarz schnell und umfassend und im Gegensatz dazu die Reoxydation langsam und unvollständig.

Nach eigenen Befunden an mehreren Tausend Ofenchargen eines Produktionsofens zur Herstellung von Ziegeln nach dem Hydratverfahren (vgl. 2.2.) konnte am Scherben eines eisenhaltigen Keupertones nach Reoxydation bei 700 °C, 750 °C, 800 °C, 850 °C folgende Färbung der Scherbenhaut beobachtet werden: gelblich, lederfarben, bräunlich, rot. Durch Nachglühen der dem Fundort entstammenden Originalscherben in Luft bei Temperaturen von 700 °C, 800 °C und 900 °C konnte die lederfarbene Tönung zwischen 700 °C und 800 °C eingeordnet werden.⁵ Bezüglich der Atmosphärenführung und der Brenntemperatur sind nach dem Befund folgende Aussagen möglich: Der durchgängig graugefärbte Scherben und das völlige Fehlen des Erscheinungsbildes "Oxydationskern mit reduzierten Außenzonen" zeigt durchgängig sauerstofffreie Atmosphäre beim Brand und bei der Kühlung an. Eine Luftkühlung scheidet also als Regelfall aus. Die Erscheinung des grauen Kernes bei mehr oder weniger starker Oxydationsfärbung der Scherbenaußenflächen weist auf sauerstofffreie Atmosphäre im Garbrandbereich mit anschließender Abkühlung unter Sauerstoffeinfluß. Bezogen auf den hohen Eisengehalt weist eine lederfarbene Tönung des Scherbens auf Sauerstoffanwesenheit in der Ofenatmosphäre während des Kühlprozesses bei Temperaturen < 800 °C. Daß es sich dabei in der Regel nicht um niedrige Sauerstoffpartialdrücke während der Aufheizphase handeln kann, zeigen die z. T. starken Oxydationszonen, bezogen auf den verbleibenden grauen Kern. Zweideutig bleibt die Aussage zu den geringen, aber vorhandenen Funden mit durchgängig lederbrauner bzw. braunroter Scherbenfarbe. Hier ist es möglich, daß entweder ein reduzierend gebrannter poröser Scherben bei der Kühlung in sauerstoffhaltiger Atmosphäre durchgängig reoxydiert wurde oder aber Sauerstoff während des gesamten Brandes und der Kühlung anwesend war. Letzteres führt bei Brenntemperaturen < 800 °C zu Schwachbrand. Aus der Summe aller Erfahrungswerte beim Hydratverfahren führt Sauerstoffanwesenheit im Temperaturbereich 500 - 800 °C zu Qualitätsverlusten. Ein lederfarben, braun oder rot, teilweise oder durchgängig gefärbter Scherben kann bei dieser Brenntechnik kein Qualitätsmerkmal gewesen sein. Es ist wahrscheinlich, daß eine durchgehend graue Farbe bei hellem Scherbenklang hohen Gebrauchswert symbolisiert hat.

Die Funde mit schwarzen Resten von organischen Bestandteilen zeigen entweder die Verwendung von kohlenstoffhaltigem Rohton oder die Einlagerung von Kohlenstoffpartikeln aus rußigen Verbrennungsgasen in vorhandenen Poren an. In beiden Fällen sind im gebrannten Scherben grobe Poren enthalten.

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, daß die Farbe der Fundkeramik in vergleichender Betrachtung zu ihrem Eisen- und Kohlenstoffgehalt ein Brennverfahren unter Sauerstoffausschluß bei Brenntemperaturen < 800 °C anzeigt.

Bezüglich der Wärmeübertragungsbedingungen gilt die Faustregel "je dünner der Scherben, um so schneller der Brand". Es ist allgemein bekannt (Holmes 1969, S. 21), daß bei starkwandigen Erzeugnissen die Oberfläche unter geringer Wärmezufuhr nur langsam erwärmt werden darf, da die Wärmeleitung innerhalb des Formlings der direkt steuernde Faktor ist.

Bei dünnwandigen Erzeugnissen erfolgt der Temperatúrausgleich weit schneller, und damit sind höhere Erwärmungsgeschwindigkeiten der Oberfläche und stärkere Wärmezufuhr zulässig. Die Brenngeschwindigkeit ergibt sich als Optimierung zwischen der thermischen Belastbarkeit des keramischen Materials, seiner Formgestaltung und der Ofenkonstruktion. Ein großvolumiges, dickwandiges Gefäß ist langsamer aufheizbar als ein kleinvolumiges, dünnwandiges Gefäß, auch wenn auf die gleiche Volumeneinheit gleiche aufzuheizende Masse entfällt. Gleiche Ofenkonstruktion und gleiche Feuerungstechnik vorausgesetzt, ergibt sich für die Brenngeschwindigkeit neben der oben angeführten maximal möglichen Aufheizgeschwindigkeit des Scherbens die Ofenraumauslastung als weitere bestimmende Größe. Ein mit Töpferware Haarhäuser Provenienz vollgestapelter Ofen hat von Natur aus eine für den Schnellbrand günstige Ofenraumauslastung. Zusammenfassend zeigt sich, daß mit Gefäßgröße, Scherbendicke und Ofenraumauslastung keine Begrenzungsfaktoren für das Erreichen ähnlich großer Aufheizgeschwindigkeiten vorhanden sind, wie sie z. B. aus antiken Öfen des Mittelmeerraumes bekannt wurden.

Aus der chemischen bzw. mineralogischen Zusammensetzung des tonigen Rohstoffes sind für den schnellen Brand ebenfalls keine gravierenden Begrenzungen erkennbar. Aufheizgeschwindigkeiten von $50 \text{ bis } 100 \text{ K} \cdot \text{h}^{-1}$ wären möglich. Im Ton bereits enthaltener Kohlenstoff ist brenntechnisch ein sicheres Mittel, eine reduzierende Atmosphäre aufrechtzuerhalten. Außerdem magern eingelagerte kohlenstoffhaltige Partikel die Tonmasse ab, was verarbeitungstechnisch von Vorteil ist. Dagegen steht die bei Töpferwaren sicherlich nicht immer erwünschte Scherbenporosität. Das Zumischen von kohlenstoffhaltigen Substanzen zum Ausgangsrohstoff der Töpferware kam offensichtlich vor, bildete aber nicht den Regelfall.

Für die Einschätzung der benötigten Brennzeit verbleibt die abschätzende Betrachtung der dem Brennprozeß vorgelagerten Trocknung und der dem Brennprozeß folgenden Kühlung. Die Trocknung kann dann als begrenzender Faktor auftreten, wenn sie als Nachtrocknung, d. h. mit Gutsfeuchtigkeiten durchschnittlich $> 3 \text{ Masse-\%}$ im Ofen erfolgt. Bei hohen Eingangsfeuchten kommt es bei zu schneller Aufheizung zum "Zerknallen" der Gefäße, was eine so nachhaltige technologische Erfahrung ist, daß sie mit Sicherheit vermieden wurde. Kritisch wird der Trocknungsprozeß auch dann, wenn kalte und einer hohen Luftfeuchtigkeit ausgesetzte Gefäße in den Ofen gesetzt werden. Unabhängig von einer vorher erfolgten Abtrocknung stellt sich an der Luft bei genügender Verweilzeit wieder das zugehörige Sorptionsfeuchte-Gleichgewicht im Gut ein, das bis 7 Masse-\% und mehr betragen kann. Auch dies gehört zur gängigen technologischen Erfahrung mit der wahrscheinlich technologischen Konsequenz, den Ofenbetrieb in feuchten und kalten Jahreszeiten einzustellen. Es ist nach Art der vorliegenden Öfen und der technologischen Situation daher unwahrscheinlich, daß bewußt eine Nachtrocknung größeren Umfangs dem Brennprozeß vorgelagert wurde. Damit sind Aufheizgeschwindigkeiten von $20 \text{ bis } 30 \text{ K} \cdot \text{h}^{-1}$ im Temperaturbereich bis 200°C anzusetzen.

Bezüglich der Atmosphärengestaltung wurde oben als gesichert eine durchgängige reduzierende Brandführung festgestellt. Dies bedeutet die Verbrennung des Brennstoffes unter Luftmangel mit der weiteren Konsequenz eines geringen Abgasvolumens. Wichtig ist zu wissen, daß es beim Brennen von Keramik mit Brennstoffen zwei Abgasströme gibt, die Feuerungsabgase als Wärmeträger und die Entgasungsprodukte des keramischen Brenngutes. Die Feuerungsabgase stehen infolge des Ofenzuges im Unterdruck, die Entgasungsprodukte infolge thermischer Dissoziation im Überdruck. Die Entgasungsprodukte strömen vom Inneren des Scherbens in die umgebende Atmosphäre, und aus der Ofenatmosphäre können Gase entgegen dieser Strömung in das Scherbeninnere diffundieren. Aus dem Verhältnis dieser Bewegungen zueinander ergeben sich unzählige Möglichkeiten atmosphärischer Einstellungen. In Abb. 9 sind für die Belange des Töpferofens Varianten dargestellt worden. Im allgemeinen Fall füllen sich die Poren eines jeden Scherbens mit Entgasungsprodukten des Tones. Je größer die Aufheizgeschwindigkeit, je dichter und je dicker der Scherben, um so sicherer bildet

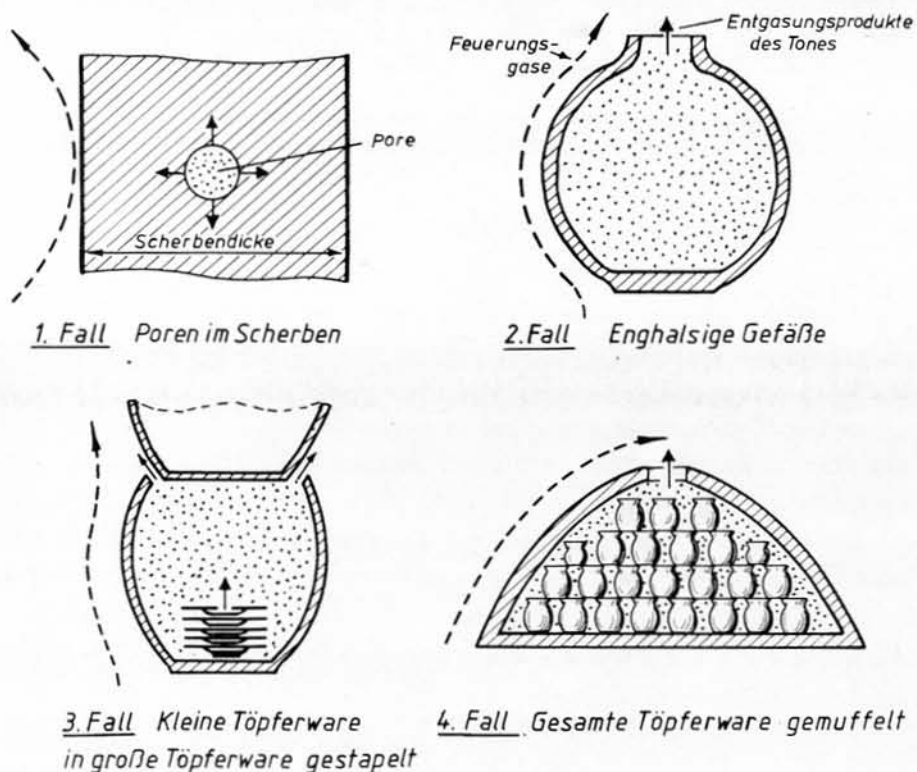


Abb. 9. Varianten des Brennens von Keramik in den eigenen Entgasungsprodukten.

sich im Scherbeninneren ein Überdruck aus Entgasungsprodukten. Im zweiten dargestellten Fall bietet das ausgeformte Gefäß mit seiner kleinen Öffnung den Feuerungsabgasen hinreichend Hindernis zum Eindringen in das Gefäßinnere. Die Entgasungsprodukte der Tonpartien des Gefäßes, die nach innen entgasen, betragen ein Vielfaches des Gefäßinhaltes und strömen fortlaufend vom Gefäßinnenraum in den Ofenraum. Im dritten Fall ist dargestellt worden, wie die in dieser Atmosphäre eingebrachten kleineren Gefäße zusätzlich ihre eigenen Entgasungsprodukte einbringen. Der vierte Fall stellt den technisch perfekten Vorgang, die Muffelung vieler Gefäße dar.

Wenn beachtet wird, daß die Phasenneubildung im keramischen Scherben von der Brenntemperatur und der Gaszusammensetzung über dem Brenngut im gleichen Maß stark abhängt und sich in technischen Öfen selten stationäre Gleichgewichte einstellen, wird erkennbar, welche Vielfalt im keramischen Brennergebnis möglich ist.

Zur Einhaltung einer reduzierenden Ofenatmosphäre während des Kühlprozesses ist der sichere Ausschluß von Sauerstoff im Ofenraum erforderlich. Dazu gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten:

- Verbrauch des in den abkühlenden Ofen nachströmenden Luftsauerstoffs durch Verbrennung im Ofen mittels eingelagerter glühender Holzkohle
- Erzeugung eines Ofenraumüberdruckes, z. B. durch Wassereindüsen
- Einbringen rauchentwickelnder Brennstoffe und sorgfältiges mechanisches Abdichten des gesamten Ofenkörpers.

Welche dieser Maßnahmen einzeln oder zusammen praktikabel sind, muß erprobt werden. Mit Sicherheit führen die Maßnahmen der Nachverbrennung und der Ofenabdichtung zu längeren Kühlzeiten. Der archäologische Befund macht im vorliegenden Falle die Kühlung zum Problem,

da in einem teilweise freistehenden Ofen Abdichtungsmaßnahmen naturgemäß erschwert sind. Ein erhöhter experimenteller Aufwand ist zur Abklärung erforderlich. Zum Problem der Wärmeübertragung liefert das archäologische Material den Hinweis, daß die freie Öffnung in der Lochtenne unverhältnismäßig klein ist. Die Wärmeübertragung vom heißen Brennstoffabgas an das Brenngut liefert nur einen Teil der benötigten Wärme. Den anderen Teil liefert die Strahlungswärme der Lochtenne. Wärmeübertragung durch Strahlung wird durch einen hohen Anteil der H₂O- und CO₂-Moleküle im Ofenabgas gefördert. Ein hoher H₂O-Anteil im Ofenabgas fördert aber wiederum die Scherbenverfestigung. Je geringer das Verhältnis von Rauchgasvolumen je Masse Brenngut wird, umso höher wird der H₂O-Gehalt in der Ofenatmosphäre, d. h., umso mehr nähert sich der Brennprozeß den Bedingungen des Brennens in den eigenen Entgasungsprodukten. Aus dem archäologischen Befund ist eindeutig der massive Unterbau des Ofens belegt, was wärmetechnisch bedeutet, daß unabhängig von einem möglichen und wahrscheinlichen schnellen Brennprozeß durch hohe Wärmespeicherung im Ofenunterbau nicht nur eine langsame Kühlung, sondern auch ein langes Verweilen des Brenngutes bei Garbrandtemperatur eintritt. Es ist dann von grundsätzlicher Bedeutung, bei welcher Temperatur der Garbrand und mit welcher Geschwindigkeit die Aufheizung erfolgt. Beim Erreichen einer Ofenraumtemperatur von 600 - 700 °C und vorhergehender schneller Aufheizung kann mit Sicherheit davon ausgegangen werden, daß die Entwässerung der Tonminerale nicht abgeschlossen ist. Ein Verschließen des Ofens bei diesen Temperaturen führt dann zwangsläufig zu einem Brand in den eigenen Entgasungsprodukten.

Somit sind zusammenfassend zwei Varianten der Führung des Brennprozesses möglich und waren durch Experimente abzuklären:

Variante 1: Abbrand mit schneller Aufheizung, langem Garbrand und langer Kühlung bei niedriger Garbrandtemperatur im oberen Temperaturbereich der Tonmineralentwässerung. Es ergeben sich Behandlungszeiten von 2 bis 4 Tagen für den Brennzyklus kalt-kalt.

Variante 2: Abbrand mit schneller Aufheizung, kurzer Garbrandzeit bei höheren Temperaturen und Zwangskühlung. Es sind Behandlungszeiten von 1 bis 2 Tagen zu erreichen. In beiden Varianten ist die Aufheizung ab spätestens 400 °C reduzierend zu fahren und die Kühlung unter Luftabschluß durchzuführen.

Das Vorhandensein von drei verschiedenen Öfen in einer technologischen Einheit läßt Überlegungen zu, ob sortimentsspezifisch gebrannt wurde. Zu dieser Frage kann endgültig erst nach der archäologischen Auswertung der Keramik Stellung genommen werden.

2.2. Verfahrensgrundsätze

Zur besseren Darstellung des Sachverhaltes werden im nachfolgenden die keramischen Brennverfahren nach ihrer Brennatmosphäre eingeteilt in:

- oxydierenden keramischen Brand
- reduzierenden keramischen Brand
- hydrothermalen keramischen Brand.

Atmosphärisch unterscheiden sich reduzierender und hydrothermaler Brand vom oxydierenden Brand durch den Ausschluß von Sauerstoff in der Brennatmosphäre. Unter hydrothermale Brand wird das Brennen im reinen Wasserdampf verstanden. Zwischen dem reduzierenden und dem hydrothermalen Brand gibt es je nach Wasserdampfpartialdruck graduelle Unterschiede. Die in diesem Sinne besondere Situation des keramischen Brandes besteht darin, daß der keramische Rohstoff während seiner Temperaturbehandlung bis ca. 800 °C laufend Wasserdampf abgibt: er kann also teilweise hydrothermal in seinen eigenen Entgasungsprodukten gebrannt werden. Dieses durch das Institut für Bau- und Grobkeramik Weimar entwickelte und großtechnisch zur Ziegelherstellung in Thüringen, Werk Niedertopfstedt, (Hohmann/Plüschke 1981, S. 47 ff.) genutzte Verfahren wird "Hydritverfahren" genannt. Für den vorliegenden Zusammenhang von Bedeutung ist die mit der unterschiedlichen Atmosphäreinstellung mögliche Temperaturabsenkung.

Am Beispiel Thüringer Keupertone (vgl. Tab. 1) ergeben sich für den Brennparameter Temperatur während des Garbrandes mit geringer Haltezeit bei oxydierendem, reduzierendem und hydrothermale Brand die Werte von 950 °C, 850 °C, 750 °C. Abbildung 10 vermittelt einen Überblick über die Abgrenzung des Hydritbrandes vom oxydierenden Brand am Beispiel 13 verschiedener Rohstoffe, die bei Temperaturen bis 900 °C nach beiden Verfahren gebrannt wurden. Zu erkennen ist der unterschiedliche Verfestigungsverlauf für beide Brennverfahren und innerhalb eines Brennverfahrens der Einfluß des Rohstoffes (Plüschke 1985). Sehr deutlich kommt in dieser Darstellung der bereits erwähnte und bekannte Sachverhalt zum Ausdruck, daß die Mehrzahl der Tone beim oxydierenden Brand mit Temperaturen < 800 °C Schwachbrand ergeben, es nach dem Hydritverfahren dagegen möglich ist, im Temperaturbereich von 700 °C bis 800 °C sicher keramisch zu verfestigen.

Tab. 1. Chemische und mineralogische Analysen Thüringer Keupertone.

	blauer Ton Sömmerda	grau- grüner Ton Sömmerda	Schiefer- ton Sömmerda	Mergel- ton Sömmerda	Durch- schnitts- ton 1 Sömmerda	Ton Nieder- Topfstedt
Glühverlust	5,74	6,51	5,83	28,50	9,20	16,15
SiO ₂	58,42	57,59	62,18	25,71	56,86	44,47
SO ₃	0,31	0,39	1,46	0,58	0,92	0,18
CaO	1,09	2,68	0,82	20,61	4,69	8,53
MgO	2,57	2,51	1,98	8,30	3,23	6,13
Fe ₂ O ₃	6,96	6,96	5,18	7,31	5,87	5,69
Al ₂ O ₃	19,95	16,47	17,02	5,92	13,77	15,09
K ₂ O	3,76	4,43	3,42	1,40	2,92	2,76
Na ₂ O	1,13	0,93	1,43	0,63	1,01	0,52

Mineralogische Zusammensetzung des Sömmerdaer Durchschnittstones 1 und des Tones Nieder-
topfstedt

Glimmer-Illit	≈ 30 %	Illitgruppe	~ 39 %
Kaolinit	≈ 10 %	Kaolinitgruppe	~ 18 %
Chlorit	≈ 10 %	Kalifeldspat	~ 8 %
Feldspat	≈ 20 %	Hämatit	~ 3 %
Quarz	≈ 20 %	Quarz	~ 19 %
Karbonate	< 10 %	Kalzit	~ 3 %
		Dolomit	~ 11 %

Als Beleg für die Verschiedenartigkeit der Verfestigungsvorgänge kann auch der Verlauf der Reindichte des gebrannten Scherbens in Abhängigkeit von der Brenntemperatur (Abb. 11) dienen. Die Abgrenzung des oxydierenden Brandes vom reduzierenden und hydrothermalen Brand ist somit eindeutig vollziehbar; er scheidet aufgabengemäß damit auch aus der weiteren Betrachtung aus.

Zum Verständnis des Unterschiedes zwischen dem reduzierenden und dem hydrothermalen Brand als jeweilige Grenzzustände soll im folgenden der Einfluß des Wasserdampfes dargestellt werden. Der Hydritbrand ist nach diesem Verständnis eine zwischen beiden stehende technische Umsetzungsvariante. Es bleibt daher eine Definitionsfrage, ob man ihn anspricht als reduzierenden Brand mit hohem Wasserdampfgehalt oder als hydrothermalen Brand mit reduzierendem Charakter.

Die bislang üblichen Erfahrungen des Keramikers mit der Wirkung des Wasserdampfes auf den keramischen Brand lagen bei der Reduktion im Garbrandbereich und bei der Kühlung, d. h. der keramische Scherben wurde oxydierend oder reduzierend "gar" gebrannt und dann durch Zugabe von Wasserdampf reduziert oder stärker verfestigt oder/und gekühlt. Nach Hohmann/Krüger/Geilich (1971, S. 115 ff.) wird dazu neu ein hydrothermaler Brand zur Verfestigung toniger Massen unter Hinzunahme des Wasserdampfpartialdruckes der Brennatmosfera als zweiter wesentlicher Brennparameter neben der Temperatur postuliert. Durch den Aufbau eines geeigneten Wasserdampfpartialdruckes über bzw. im Brenngut während der Dehydroxylation der Tonminerale lassen sich die Dehydroxylation selbst sowie stimulierte Neben- und Folgereaktionen so regeln, daß es zu einer irreversiblen Stoffverfestigung kommt,

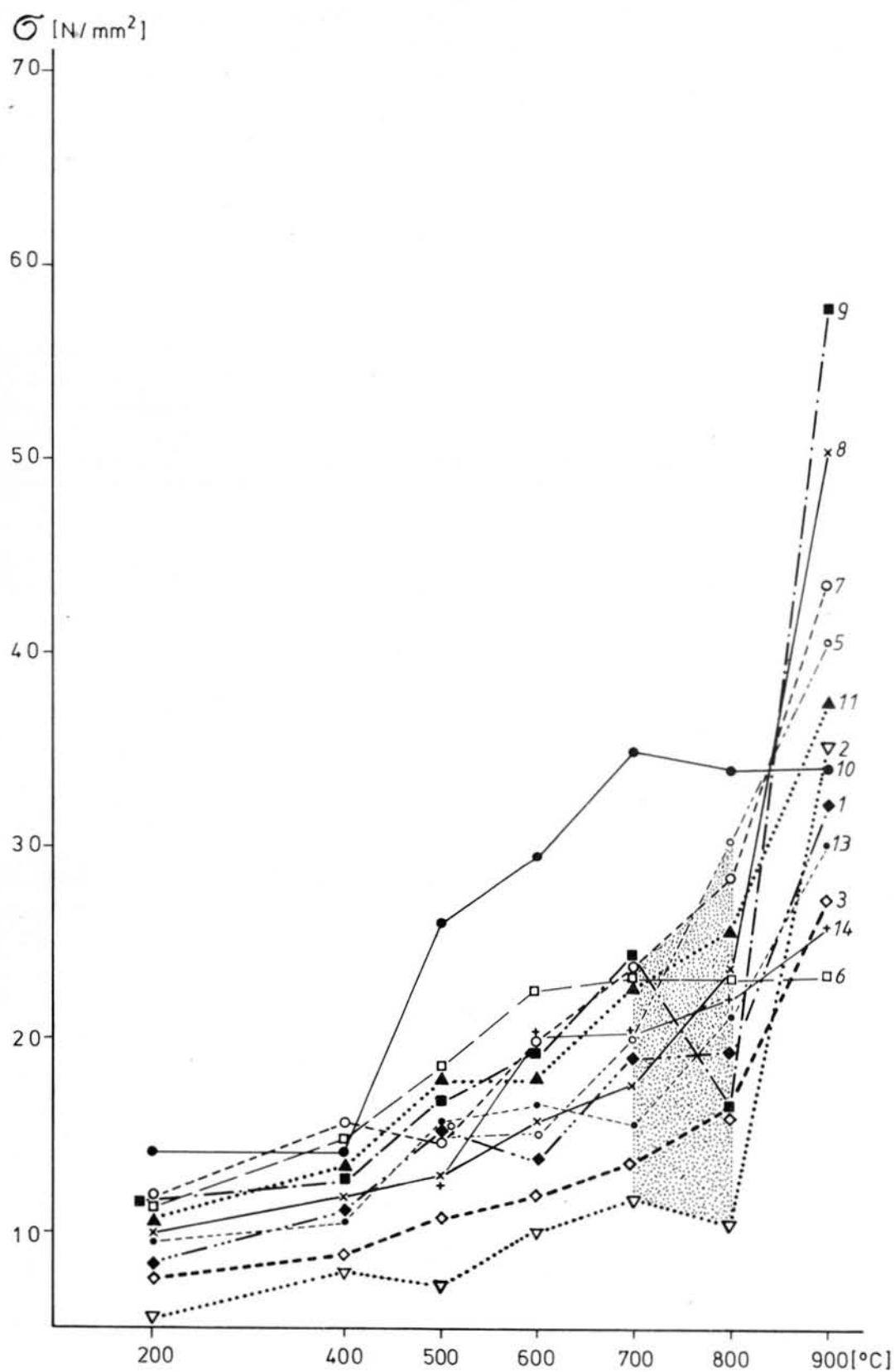


Abb. 10. Verfestigung versch. Tone [Hainichen (1), Zwinge (2), Ferna (3), Walpernheim (4), Eisenberg (5), Hohenebra (6), Niedertopfstedt (7), Gispersleben (8), Dollstedt (9), Stregda (10), Wefensleben (11), Gerstungen (13) und Gotha (14)] (n. Plüschke 1985) in Abhängigkeit von der Brennatmosfera.

1 - oxydierender Brand, 2 - Hydritbrand

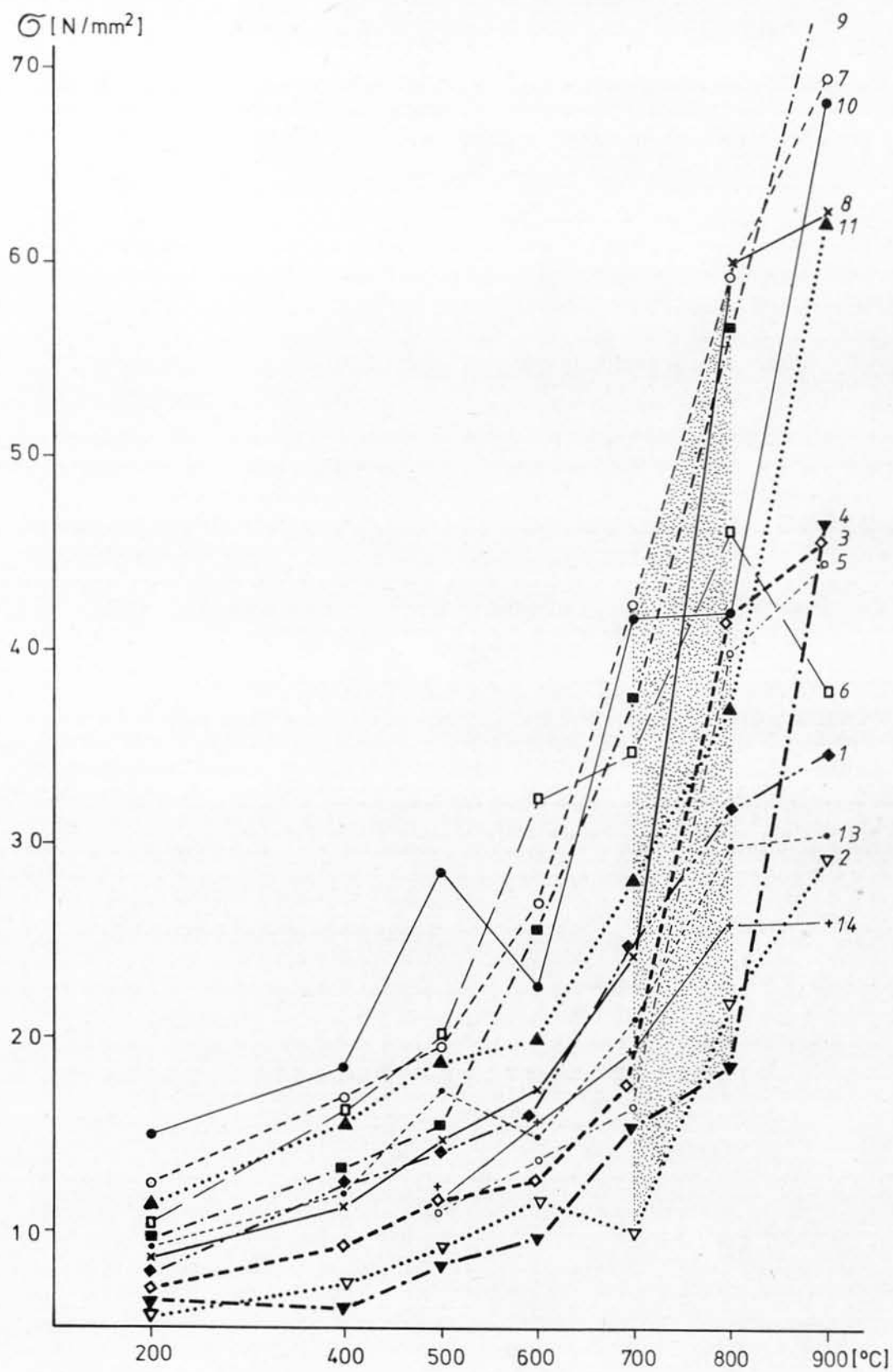


Abb. 10,2. Legende s. Abb. 10,1.

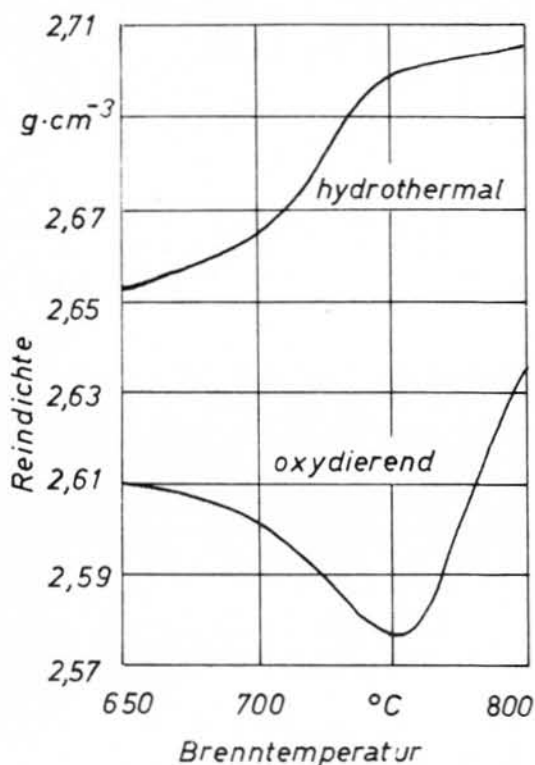


Abb. 11. Abhängigkeit der Reindichte des keramischen Scherbens von der Brenntemperatur im Ergebnis des oxydierenden und des hydrothermalen Brandes eines Thüringer Keupertones.

die entsprechend dem gewählten Rohstoff und entsprechend den gewählten hydrothermalen Brennbedingungen zu modifizierten keramischen Gebrauchseigenschaften führt. Abb. 12 zeigt den Vergleich der Festigkeit eines Thüringer Keupertones (Tab. 1) beim oxydierenden und beim hydrothermalen Brand. Der hydrothermale Brand erfolgte in reinem Wasserdampf beim Doppelten des Atmosphärendrucks. Die Festigkeit, die in diesem Beispiel der Sömmerdaer Durchschnittston 1 im oxydierenden Brand bis 1000 °C erreicht, erzielt er im hydrothermalen Brand bereits bei 720 °C. Wie Weber (1970) nachweisen konnte, handelt es sich dabei um eine echte irreversible Verfestigung. Die Untersuchungen zur Abhängigkeit der keramischen Scherbenbildung in reinem Wasserdampf von der Brenntemperatur und der Haltezeit bei Garbrand brachten am Beispiel des Sömmerdaer Tons die Ergebnisse der Tabelle 2.

Tab. 2.

Brenntemperatur	Haltezeit Garbrand	Biegezugfestigkeit	Wasseraufnahme TGL 9358	Brennschwindung lineare
in °C	in h	in kp·cm ⁻²	in Masse-%	in %
695	6	136	14.8	0.8
702	0	76	15.3	0.0
750	6	177	14.6	1.2
750	0	100	-	0.2
797	6	196	13.8	1.2
800	0	202	13.7	1.1

Danach ist der Einfluß der Haltezeit bei niedrigen Garbrandtemperaturen sehr groß, d. h. auch bei Temperaturen um 700 °C kann bei langen Haltezeiten hohe Verfestigung erzielt werden. (Die Absolutwerte der Biegezugfestigkeit sind nicht mit denen der Abb. 12 vergleichbar, da andere Rohstoffaufbereitungsbedingungen und Prüfvoraussetzungen vorlagen.) Die Untersuchungen zur Abhängigkeit der keramischen Verfestigung von wechselnden Brenn-atmosphären brachten am Beispiel des Niedertopfstedter Tones (vgl. Tab. 1) folgendes Ergebnis (Tab. 3):

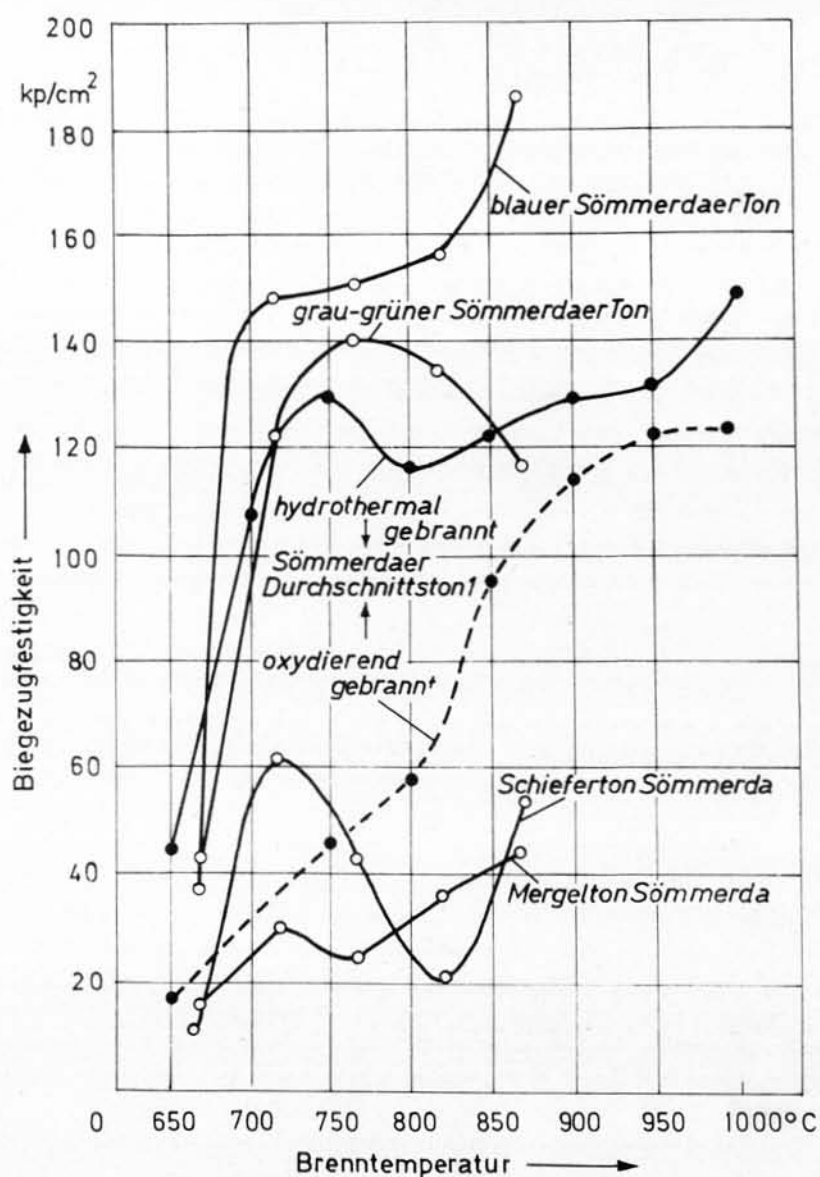


Abb. 12. Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit des hydrothermal gebrannten Scherbens von der Brenntemperatur bei einem Wasserdampfpartialdruck von $2 \cdot 10^5$ Pa und einer Garbrandhaltezeit von 1 h.

Tab. 3.

Brennen		Kühlen		
von 450 °C bis 600 °C in:	von 600 °C bis 800 °C in:	in Luft	oder	in Wasserdampf
Luft	Luft	90 $\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}$		72 $\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}$
Wasserdampf	Luft	110 $\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}$		64 $\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}$
Luft	Wasserdampf	210 $\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}$		146 $\text{kp} \cdot \text{cm}^{-2}$

Daraus ist abzuleiten, daß der entscheidende scherbenverfestigende Einfluß des Wasserdampfes im Temperaturbereich von ca. 600 bis 800 °C liegt. Wasserdampf im Temperaturbereich davor und danach hat derartigen großen Einfluß nicht. Diese Aussage ist von entscheidender Bedeutung für die Art der Brennführung und damit der Wertigkeit hydrothermaler Erhärtung als eigenständiges Verfahren. Aus dem Vergleich des Verfestigungsverlaufes der vier Lagerstättenkomponenten des Sömmerdaer Durchschnittstones mit dieser chemischen und mineralogischen Zusammensetzung (Tab. 1) kann als Orientierung angegeben werden: Zum hydrothermalen Brand bei 800 °C eignen sich besonders illitische Tone mit hohem Al_2O_3 -, hohem Fe_2O_3 - und hohem Alkaligehalt. Bezüglich weiterer Fragestellungen zum Einfluß des Wasserdampfpartialdruckes der Gasphase auf die Phasenbildungsreaktionen beim hydrothermalen Brennen von Tonen sei auf die Arbeit von Krüger (1971) verwiesen. Bemerkenswert für den vorliegenden Zusammenhang ist noch der Befund, daß unter niedrigen Garbrandtemperaturen beim hydrothermalen Brand geringe Kühlempfindlichkeit und geringe Brennschwindung des Scherbens beobachtet werden.

Der technischen Umsetzung dieser grundsätzlichen Verfahrenszusammenhänge des hydrothermalen Brandes im Hydritlehverfahren liegt, wie bereits erwähnt, die Tatsache zugrunde, daß der keramische Rohstoff während seiner Temperaturbehandlung bis ca. 800 °C laufend Wasserdampf abgibt. Der spezielle Grundsatz des Hydritlehverfahrens ist daher das Brennen in den eigenen Entgasungsprodukten.

Die chemisch-mineralogische Grundlage dieser Tonentgasung bildet die thermische Zersetzung einer Vielzahl von Mineralien. Die in Abb. 13 dargestellte Gewichtsverlustkurve des Sömmerdaer Tons zeigt als Hauptkomponenten den Wasserdampf aus der Resttrocknung und der Sorptionsfeuchte bis ca. 150 °C, die Entgasungsprodukte der organischen Bestandteile zwischen 150 °C und 450 °C, den Sauerstoff und Schwefelwasserstoff, respektive Schwefeldioxid, aus der Fe_2O_3 - bzw. FeS_2 -Zersetzung bei 400 °C bis 500 °C, den Wasserdampf aus der Dehydroxylation der Tonmineralien, vorzugsweise Illit, bei 520 °C bis 720 °C und das Kohlendioxid aus der Dolomit- und Kalkzersetzung bei 600 °C bis 900 °C. Im gleichen Temperaturbereich liegen auch die Vergasungs- oder Verbrennungsprodukte des Kohlenstoffes im Ton, sofern enthalten. Die für die Prozeßführung wichtige Wasserfreisetzung aus der Dehydroxylation der Tonminerale in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt in allgemeiner und vergleichender Darstellung die Abb. 14. Instrukтив ist das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Tonminerale. Die freiwerdenden Wasserdampfmengen sowie ihre Freisetzungstemperaturen verändern sich in Abhängigkeit von der Tonzusammensetzung und den Verfahrensparametern stark. In technischen Anlagen sind sie daher genau experimentell zu bestimmen, wenn darauf Verfahrensvorschriften oder Deutungen aufgebaut werden.

Abb. 15 zeigt den Anteil des Wasserdampfes an der Atmosphäre des Brennraumes eines industriellen Hydritlehofens mit 90 m³ Brennraumvolumen, in dem innerhalb von 24 Stunden bei 775 °C aus 24 000 kg Thüringer Keuperton 12 000 Normalformat-Ziegel in ihren eigenen Entgasungsprodukten gebrannt werden. Es ist erkennbar, daß der Wasserdampfpartialdruck im entscheidenden Bereich bis 95 % des Systemdruckes erreicht. Das zusätzliche breite Ausziehen der Entwässerung im Hydritlehofen ergibt sich aus den Temperaturdifferenzen in allen drei Ofenachsen. Bei indirekter Beheizung, auch im gemuffelten Ofen, ergibt sich immer dann ein Hydritlehbrand, wenn das Verhältnis von Masse der eingesetzten Keramik zum gesamten Brennraum hinreichend groß ist und der Brennraum nach außen hinreichend gasdicht ist. Im oben angeführten Beispiel des industriellen Hydritlehofens entstehen aus den ca. 10 % Gewichtsverlust 2 000 - 3 000 m³ Wasserdampf, also ein Vielfaches des Brennraumvolumens. Der Wasserdampf "drückt" vom Brenngut in den Brennraum und von da in die Umgebung des Brennraumes. Er hält also vom Brenngut andere Gase fern. So erklären sich auch für einen offenen Meilerbrand mit der Wärmewanderung von außen nach innen und der Wasserdampfwanderung von innen nach außen zwanglos gute Brennergebnisse bei niedrigen Temperaturen. Bei direkter reduzierender Beheizung, z. B. eines Töpferofens, bilden sich zwei in diesem

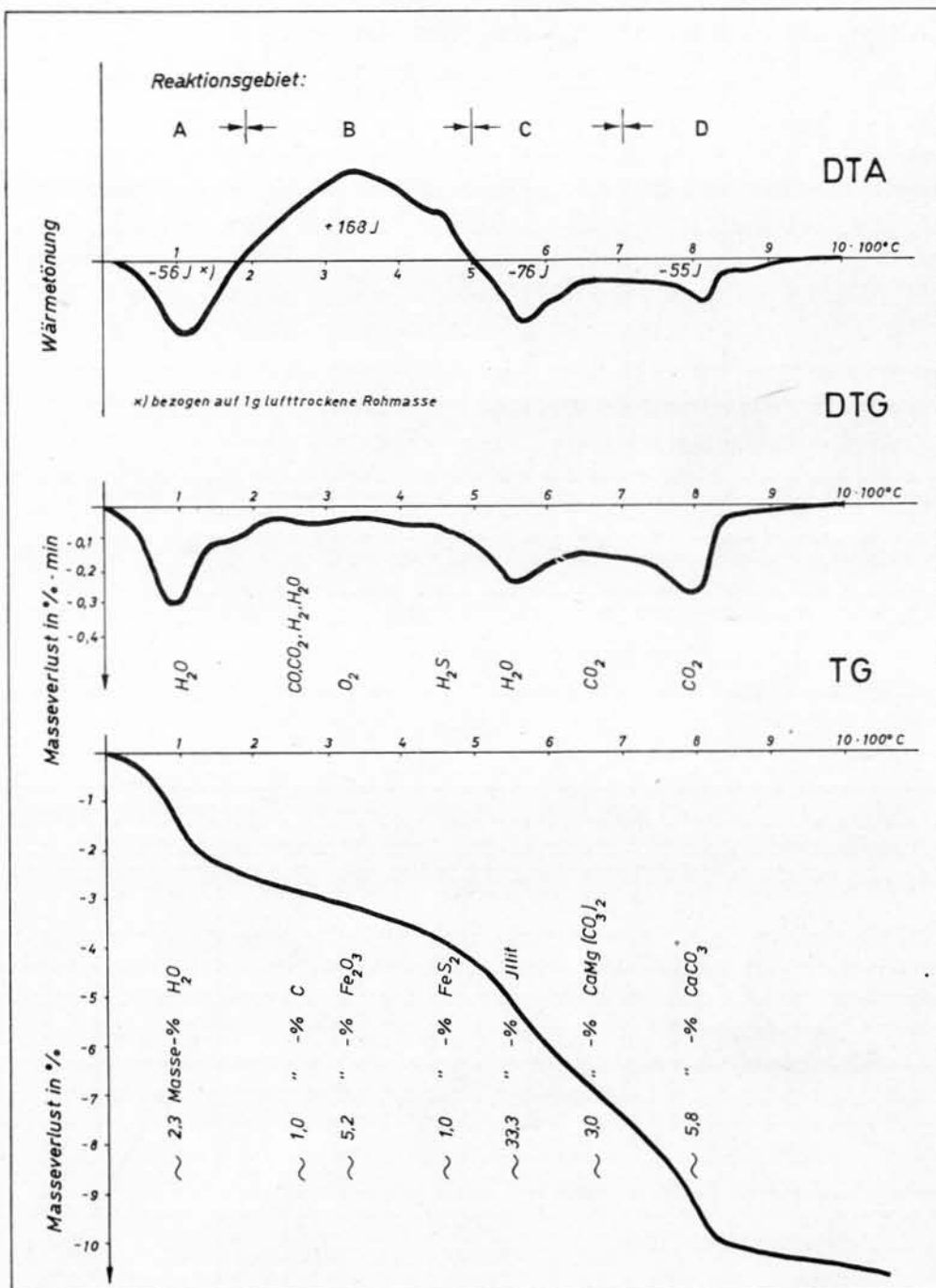


Abb. 13. Ergebnisse der Thermogravimetrie und der Differentialthermoanalyse eines Thüringer Keupertones (Ton Sömmerda).

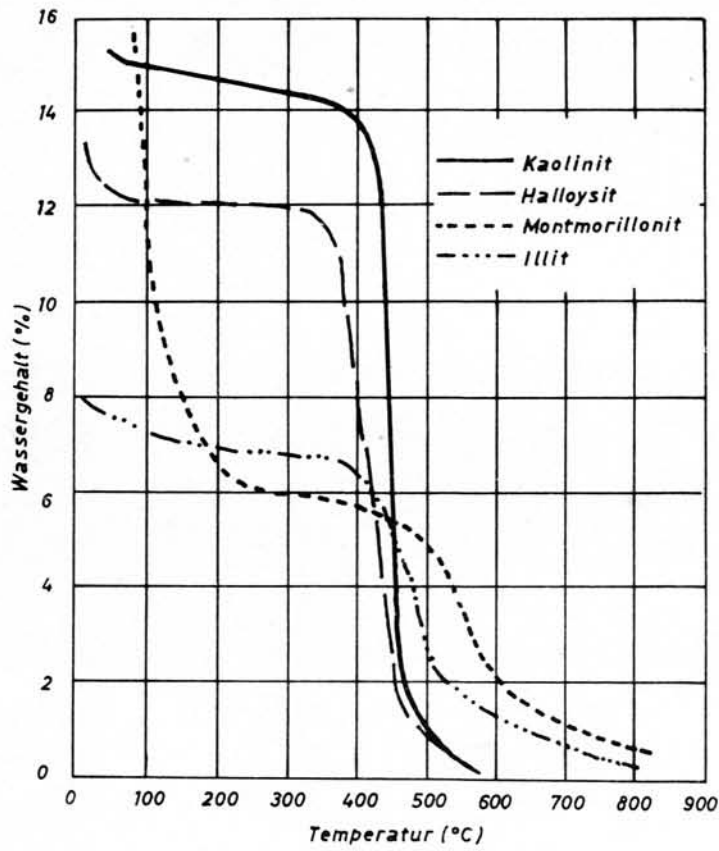


Abb. 14. Vergleichende Übersicht über die Wassergehalt (%) von Kaolinit, Halloysit, Montmorillonit und Illit bei Temperaturbehandlung.

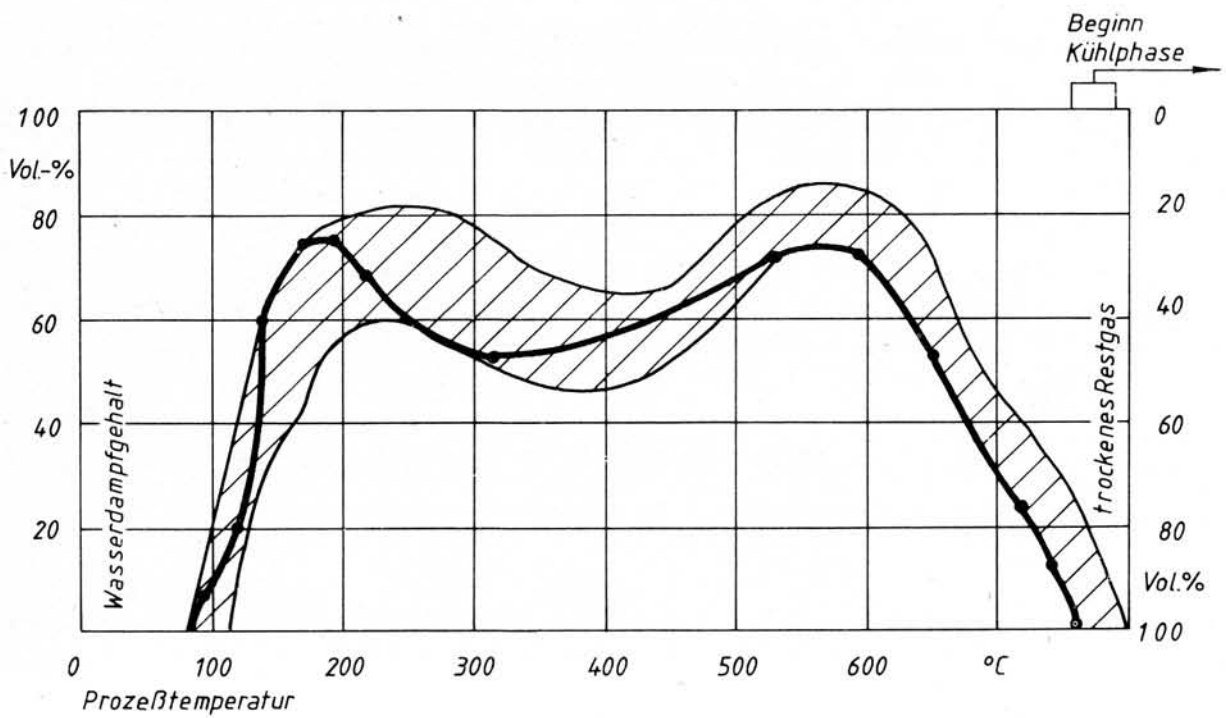


Abb. 15. Anteil des Wasserdampfes an der Brennraumatmosfera im Hydritofen.

Sinne gesondert zu betrachtende Brennräume. Im Gefäß selbst entsteht in der Regel eine hydrothermale Atmosphäre aus den Entgasungsprodukten des keramischen Scherbens, in den Zwischenräumen des Einsatzgutes dagegen eine Atmosphäre, die durch Mischung der reduzierenden Rauchgase mit den Entgasungsprodukten des Tones hoch mit Wasserdampf angereichert ist.

3. REKONSTRUKTION UND AUFBAU DES TÖPFEROFENS

3.1. Rekonstruktion des Töpferofens

Die auf zahlreichen Versuchsbränden basierenden Erkenntnisse Winters (1978, S. 90): "Die Variation in der antiken Keramik ergeben sich zwangsläufig einmal aus den Innenproportionen der Brennanlagen, sodann auch aus der Schürweise des Brenners" werfen ein Schlaglicht auf die determinierende Bedeutung der Details des Ofenbaues, außer dem gewählten Baumaterial besonders der Proportionen.

Der vorzügliche Erhaltungszustand des Ofens III von Haarhausen lieferte für zahlreiche Details sichere Ausgangspositionen. Gegeben sind die Grundmaße des Ofens; bei der Gesamtlänge von 2,5 m entfallen ca. 1,35 m auf den Feuerungs- bzw. Brennraum.

Der Töpferofen muß mit dem unteren Teil eingetieft sein, so daß ca. die Hälfte der Höhe des Schürhalses und der Feuerungsraum im Erdreich liegen. Diese Maßnahme ist notwendig wegen der in diesen Bereichen hohen Brenntemperaturen (vgl. auch Ofen von Speicher nach Loeschke 1922, S. 2).

Die Grundsohle des Ofens weist ein Gefälle von ca. 15° von der Schürhalsöffnung zur gegenüberliegenden Wandung des Feuerungsraumes auf. Damit wird ein reibungsloser Brand, d. h. es werden gute Zugverhältnisse gesichert, wenn sich im fortgeschrittenen Brennstadium der Feuerungsraum mit glühendem Brennmaterial, Holzkohle oder Asche füllt. Ofensohlen mit Gefälle sind folgerichtig nur an Öfen mit relativ hohem Schürhals oder Feuerungsraum gebunden, bei denen das Aufschüren im Schürhals erfolgt. Dagegen ist ein Aufsteigen der Ofensohle bei latènezeitlichen eingetieften Töpferöfen mit extrem niedrigem Feuerungsraum und Schürhals bekannt, was Faßhauer (1959, S. 276) zu der These veranlaßte, daß die Befuerung dieser Anlagen vor der Schürhalsöffnung, von der Ofengrube aus, erfolgte.

Der Schürhalsaufbau erfolgt originalgetreu nach dem vollständigen archäologischen Befund. Von einer lichten Breite : Höhe von 0,40 m : 0,40 m an der Schürhalsöffnung erweitert sich das tunnelförmige Gebilde auf 0,9 : 0,45 m (lichtes Maß) an der Stelle seiner Einmündung in den Feuerungsraum. Die Stärke der aus mit Häcksel gemischtem Lehm hergestellten Wandung steigt vom Öffnungsbereich bis zur Stelle seiner Verbindung mit dem Feuerungsraum von 6 auf 8 cm an.

Für den Aufbau des Steges werden Ziegel aus in gleicher Weise aufbereitetem Lehm mit den Abmessungen 19 x 20 x 10 cm hergestellt und luftgetrocknet. Sie liegen je vier Stück in einer Reihe und werden in vier Schichten übereinander aufgebaut, wobei die Längsseiten mit Lehm zu verschmieren sind. Die Höhe des Steges ergibt sich aus der lichten Höhe des Schürhalses, da aus brenntechnischen Gründen Unterkante des Schürhalses und Oberkante des Steges eine Ebene bilden müssen.

Die Wandung des Feuerungsraumes schließt ein Oval von 1,1 : 1,3 m lichten Maßes ein. Sie wird errichtet aus den mehrfach nachgewiesenen Ziegeln, die aus mit Häcksel gemischtem Lehm geformt und luftgetrocknet eine Breite von 9 bis 10 cm und Stärken von 2,5 und 4,0 cm besaßen. Da diese Lehmziegel weniger widerstandsfähig und daher auch bei anderen Töpferöfen stark beschädigt sind (Winter 1978, S. 41), kann deren Länge nur in Analogie zu

den römischen flachen Ziegeln mit 13 bis 14 cm angenommen werden. Bei einer Wandungsstärke von 20 - 35 cm werden an die Außen- und Innenseite Ziegel gesetzt und der Zwischenraum mit einem Gemisch aus Lehm und Häcksel gefüllt. Als rekonstruierbare Höhe dieses Wandungsteils ist die Höhe des Steges anzunehmen, also 0,40 - 0,45 m, da auf beiden die Lochtenne aufliegen muß. Diese Proportionen einer Hölle (Höhe < 1 m) sprechen nach den Erfahrungen Winters (1978, S. 40) für einen zur Reduktion neigenden Ofen.

Problematisch ist die Frage der Lochtenne, für die es im archäologischen Befund von Haarhausen keinen Anhaltspunkt gibt. Rückschlüsse aus der Fundkeramik, die eindeutig reduzierende Brenn-atmosphäre belegt, lassen keinen Zweifel an der Existenz einer Lochtenne zu. Parallelbefunde aus dem provinzialrömischen Gebiet, wie Heddernheim, Ofen 4a (Thomas 1894, S. 15), Köln, Lungengasse, Ofen 1 (La Baume 1958, S. 26), Kastel (Winter 1957, S. 483), Benningen Ofen 4 (Planck-Röske 1978/79, S. 138) oder Walheim (Bersu/Goessler/Paret 1917, S. 125) bestätigen den Einbau von Lochtennen mit Stärken von 10 bis 15 cm ebenso wie auch das Modell eines Töpferofens von Nijmegen (Steiner 1910, S. 75). Eine Stärke von 10 bis 12 cm (nach der Trockenschwindung) darf auch für den zu rekonstruierenden Töpferofen angenommen werden, da sie etwa mit der Stärke des Schürhalses, mit dem die Lochtenne abschließt, korrespondiert.

Nach analogen Befunden oder Erkenntnissen von Versuchsbränden müssen auch Anordnung, Größe und Gesamtfläche der Tennenlöcher (Pfeifen) rekonstruiert werden. Dabei zeichnen sich zwei Vergleichsmöglichkeiten ab: eine Variante mit gleichgroßen Löchern, wie z. B. die bei den Öfen von Walheim (Bersu/Goessler/Paret 1917, S. 125) 8 cm großen Löcher, über die gesamte Tennenfläche verteilt oder bei Ofen 1 von Köln, Lungengasse (La Baume 1958, S. 26), die 2. Variante mit der Anordnung größerer (5 cm Dm) Löcher an der Peripherie der Lochtenne und kleinerer (3 - 4 cm Dm) im Zentrum, z. B. Heddernheim Ofen 4b (Thomas 1894, S. 15) oder Mainz-Kastell (Winter 1957, S. 483).

Bei den zahlreichen von Winter (1978, S. 37 ff.) durchgeführten Versuchsbränden konnten verallgemeinernde Erkenntnisse über das Verhältnis von Schürhalsöffnung zur Summe der Durchlaßöffnungen und zum Abzug gewonnen werden. Die hierfür ursprünglich (Winter 1956, S. 112) angegebene Relation von 4 : 3 : 1 als optimale Voraussetzung für gute oxydierende Brennbedingungen im Ofen wurden später durch eine für den griechischen Brand vorteilhafte Lösung korrigiert. Danach sollte das Verhältnis wie 3 : 2 : 1 gestaltet sein. Gegeben ist in Haarhausen für die Gleichung die Größe der Schürhalsöffnung mit $\approx 1500 \text{ cm}^2$. Andererseits wird nach den Erfahrungswerten Winters (1978, S. 42) reduzierende Brenn-atmosphäre in einem Ofen von 1 m^3 Kapazität durch eine Summe von Pfeifenöffnungen, die $1/40$ der Fläche der Lochtenne beträgt, garantiert, es scheint damit die Grenze der Rentabilität zwischen Brennzeit und Fassungsvermögen erreicht zu werden.

Bei der archäologisch überlieferten Grundfläche des Feuerungsraumes von $1,1 \times 1,3 \text{ m}$ (vereinfacht gerechnet mit $1,20 \text{ m Dm}$) und der Prämisse, daß diese Fläche mit der Lochtennenfläche identisch ist, muß der rekonstruierte Ofen eine Lochtennenfläche von $1,13 \text{ m}^2$ haben. Soll nach den Erfahrungen Winters für reduzierende Brenn-atmosphäre die Gesamtfläche aller Durchlässe $1/40$ dieser Fläche betragen, so ergeben sich folgende Berechnungen:⁷

$$Dm = 120 \text{ cm}$$

$$F(\text{Lochtenne}) = 60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 3,14 = 11\,304 \text{ cm}^2$$

$$F(\text{Steg}) = 110 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 2\,200 \text{ cm}^2$$

$$F(\text{Lochtenne}) - F(\text{Steg}) = 9\,104 \text{ cm}^2$$

$$\text{bei } F(\text{Lochtenne}) : F(\text{Pfeifen}) = 1/40 = 225 \text{ cm}^2$$

$$\text{bei } Dm(\text{Pfeifen}) \text{ von } 3 \text{ cm} = 7,1 \text{ cm}^2 = 32 \text{ Stck.}$$

$$\text{bei } Dm(\text{Pfeifen}) \text{ von } 2 \text{ cm} = 3,14 \text{ cm}^2 = 73 \text{ Stck.}$$

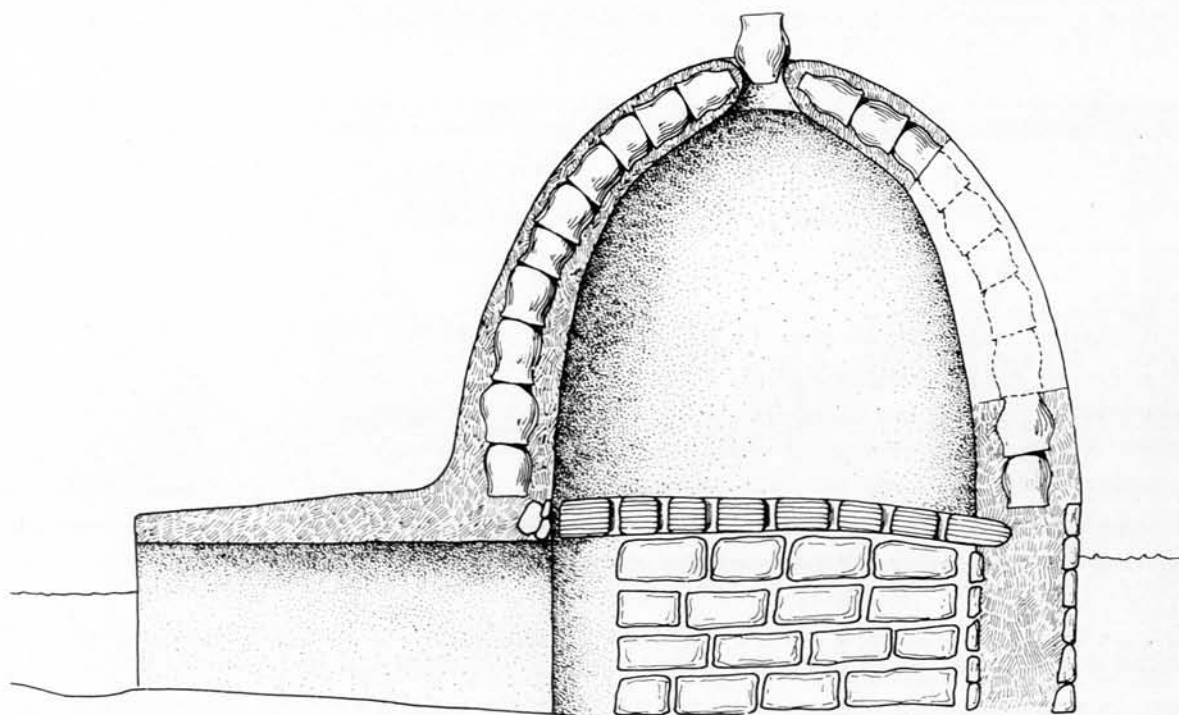


Abb. 16. Rekonstruktion des Töpferofens III von Haarhausen als Vorlage für den Nachbau.

Bei der Anlage von Pfeifen mit einem Durchmesser von 2,8 cm ($F = 6,2 \text{ cm}^2$) entfallen bei der geplanten Summe aller Durchlässe von 225 cm^2 36 Stück.

Die Höhe des Brennraumes läßt sich aufgrund der gegebenen Höhe des Feuerungsraumes mit größter Wahrscheinlichkeit angeben. Da an dem Modell des Töpferofens von Nijmegen das Verhältnis des Feuerungs- zum Brennraum 1 : 2 beträgt (Steiner 1910, S. 75), darf bei gegebener Höhe des Feuerungsraumes des Haarhäuser Ofens III von 0,45 m eine Höhe des Brennraumes von 0,9 - 1 m angenommen werden. Diese Werte liegen völlig in dem nach Winter (1978, S. 41) brenntechnisch positiven Dimensionsbereich eines Brennschachtes. Die Kuppelform des Brennraumes ist durch Lehmreste der gewölbten Wandung von Ofen III sicher belegt. Ebenfalls spricht das keramische Fundmaterial des Töpfereibezirkes von Haarhausen für durchweg reduzierende Brennatmosfera, die nur im kuppelförmigen Ofen mit einer Abzugsöffnung zur Regulierung des Brennprozesses erreicht wird. Diese These ist von Winter (1978, S. 27) in zahlreichen Brennversuchen verifiziert worden. Dagegen ergaben Winters und Bryants (1978/79, S. 13 ff.) Brennversuche in Schachttöfen deren ausschließliche Nutzung für oxydierende Brände. Als weiterer Hinweis auf die Kuppelform sei nochmals auf das Töpferofenmodell von Nijmegen (Steiner 1910, S. 75), aber auch auf die bildlichen Darstellungen von Töpferöfen (Dreus 1978/79, Fig. 21) verwiesen.

Als Baumaterial für den Brennraum sind Wölbtopfe zu verwenden, die, auf der Mündung stehend, kreisförmig angeordnet werden. Die nächstfolgende Schicht dieser Art von Baukeramik wird entsprechend der angestrebten Höhe und Neigung der Kuppel etwas geneigt (Abb. 16). Von beiden Seiten werden die Wölbtopfe mit gemagertem Lehm dick verschmiert.

Der Einsatz von Wölbtopfen ist an mehreren Töpferöfen des provinzialrömischen Gebiets nachgewiesen, wie z. B. in Speicher auf der Fundstelle "Auf der Zweibach" (Loeschke 1922, S. 4), in Welzheim (Bersu/Goessler/Paret 1917, S. 130) oder in Heddernheim Ofen 4 B

(Thomas 1894, S. 15). Sie sind in Töpferöfen von Pompeji und an rezenten Öfen in Süditalien, Siziliens oder auf Korfu verbaut worden (Hampe-Winter 1965). Wölbtöpfe zeichnen sich aus durch

- leichte Manipulation als Baumaterial
- Reduzierung statischer Probleme
- hervorragende wärmeisolierende Funktion
- größere Haltbarkeit als Lehmziegel oder ausschließlicher Lehmmantel.

Der zu rekonstruierende Töpferofen muß auch trotz der im archäologischen Befund von Haarhausen fehlenden Anhaltspunkte mit einer Einsetzöffnung versehen werden. Das technisch hohe Niveau des Ofenbaues läßt für eine Vorstellung des jeweiligen Auf- und Abbaues der Kuppel für die Beschickung bzw. die Entleerung des Brennraumes keinen Raum. Außerdem stützen einige archäologische Befunde diese Interpretation. Der Töpferofen 4 b von Heddernheim hatte über dem Schürloch eine im Durchmesser 50 cm große Einsetzöffnung (Thomas 1894, S. 15), ebenso der Ziegelofen I von Speicher (Loeschke 1922, S. 3), am Ziegelofen II von Speicher stellte Loeschke (1931, S. 5) eine auf der Rückseite gelegene 0,60 cm breite Einsetzöffnung fest. Die Andeutung einer solchen Öffnung enthält auch das Töpferofenmodell von Nijmegen (Steiner 1910, S. 75), ältere Darstellungen griechischer Ofentypen gleicher Art lassen ebenso seitliche Öffnungen erkennen (Drews 1978/79, S. 40). Bei der ovalen Grundform des nachzubauenden Töpferofens ist die Anordnung der Einsetzöffnung auf der Rückseite des Ofens angebracht; die Weite von ca. 55 cm muß das Hantieren im gesamten Brennraum garantieren.

An der Spitze der Kuppel bleibt das Abzugsloch, dessen Funktion zur Regulierung der Brenn-atmosphäre oder des Brandverlaufs schon erwähnt wurde.

3.2. Ofenbau

Am 24. 6. 1981 wurde der Standort zum Aufbau des Töpferofens am Ortsausgang von Haarhausen in Richtung Sülzenbrücken, ca. 500 m von der Grabungsstelle entfernt, festgelegt. Die Ofen-grube wurde nach folgenden Grundmaßen in konischer Form mit Ost-West-Richtung für die Ofen-längsachse abgesteckt: Gesamtlänge 2 500 mm, Gesamtbreite 2 000 mm. Der Höhenunterschied im Hang, vom Schürlocheingang zur äußeren Ofenmantelbegrenzung, von ca. 800 mm, mußte durch Ausschachtungen beseitigt werden. Für die Wahl des Standortes waren in erster Linie die Er-fordernisse der Ver- und Entsorgung der Versuchsanlage maßgebend. Für die Aufbereitung des Baumaterials wurden in 5 m Entfernung von der Ofengrube zwei Maukruben (Taf. VI, 1) mit den Ausmaßen 1 800 mm x 1 600 mm x 600 mm = 1,73 m³) ausgeschachtet. Für den Ofenbau war es er-forderlich, den benötigten Rohstoff aufzubereiten, um daraus das Baumaterial in manueller Arbeit herzustellen. Es wurden zwei unterschiedliche Rohstoffe aus einem Hanganschnitt des Weinberges ca. 800 m vom Ortsausgang Haarhausen in Richtung Sülzenbrücken entfernt, verwen-det.⁷ Beide lagen im Hanganschnitt übereinander und entstammen dem mittleren Keuper. Roh-stoff 1 war ein rötlich-ockerfarbener Lehm (Farbe: MRK) mit teilweise Gesteinseinschluß, Rohstoff 2 ein blaugrauer Lehm (Farbe: MAG). Farbangaben erfolgen nach Fachbereichsstandard TGL 34329, Gesteinsfarben 12/1979. Die chemische Analyse⁵ ergab:

Tonprobe 1 = 6,9 Masse% Fe₂O₃; 24,4 Masse% Al₂O₃.

Tonprobe 2 = 5,9 Masse% Fe₂O₃; 25,3 Masse% Al₂O₃.

In den Maukruben wurde der Lehm mit Strohhacksel und Wasser gemischt und solange durchtre-ten, bis eine gut bildsame Arbeitsmasse entstand. Grobe Gesteinseinschlüsse wurden mit Hand aus dem Lehm entfernt. In der Bauphase wurden die Maukruben 4mal mit Rohstoff 1 und 1mal mit Rohstoff 2 gefüllt (insgesamt ca. 8,0 m³). Rohstoff 1 wurde in einer Volumenmischung von 10 : 1 für Lehm und Hacksel verwendet für die Herstellung von

280 Lehmziegel der Abmaße 40 mm x 140 mm x 100 mm,

65 Lehmziegel der Abmaße 25 mm x 130 mm x 100 mm,

30 Lehmziegel der Abmaße 100 mm x 190 mm x 220 mm.

Für die Lochtenne, den Schürhals, die Mauerzunge und die Ofenmantelverfüllung wurde das Mischungsverhältnis Lehm zu Häcksel auf 10 : 5 erhöht und für die Ofensohle Rohstoff 1 ohne Zugabe von Häcksel benutzt.

Die innere Verfüllung der mit den Lehmziegeln aufgemauerten Außenwände des Unterofens erfolgte mit Rohstoff 2, der mit Häcksel im Volumenverhältnis von 10 : 1,5 vermischt wurde.

Der Aufbau des Töpferofens begann mit durchschnittlich täglich 3 - 4 Mitarbeitern am 14.9.81 und konnte nach 18tägiger Arbeit bei ungünstigen Witterungsbedingungen am 9.10.81 abgeschlossen werden. Als technische Hilfsmittel kamen zur Anwendung: Hammer, Schaufel, Säge, Nägel, Holz und Grabungskellen. Die gesamte Ofengrube erhielt eine 350 mm starke, gestampfte, ungemagerte Lehmschicht aus Rohstoff 1 (Taf. VII,₂). Mittels eines kleinen Holzfeuers, über die gesamte Ofensohlenfläche verteilt, wurde der Trocknungsprozeß des eingestampften Lehms forciert.

Die Herstellung der benötigten Lehmziegel für die Ofenumrandung, den Mauersteg und den Schürhals erfolgte in Holzformen. Die Rohlinge wurden luftgetrocknet (Taf. VI,₂; VII,₁).

Nachdem die Belastbarkeit der Ofensohle gewährleistet war, wurde der Mauersteg aus 20 Lehmziegeln (100 mm x 190 mm x 220 mm) errichtet sowie die 1. Schicht der Ofenwandung und des Schürhalses gesetzt und verfüllt (Taf. VIII,₁). Die Komplettierung des Mauersteges sowie der Ofenwandung schloß sich an (Taf. VIII,₂).

Der Schürhalseingang erhielt beidseitig für die Schürhalswölbung ein Widerlager in Form zweier Natursteine, welche in situ vorlagen.

Als großes Problem erwies sich die Anfertigung der Lochtenne. Die Lochtenne muß unter anderem eine statisch tragende Funktion erfüllen, d. h., sie muß das Brenngut sowie ihr eigenes Gewicht tragen können. Diesen Anforderungen gemäß wurde die Lochtenne in leicht gewölbter Form vorgefertigt. Der vorzufestigende Durchmesser der Lochtenne von 1 600 mm x 1 250 mm erhöhte sich unter Hinzurechnen der Schwindung des Rohstoffes um 10 % auf 1760 mm x 1375 mm. Eine Lochtennenschablone wurde in vier Segmenten vorgefertigt, mit Rohstoff 1 verfüllt und durch Schlagen mit dem Holzhammer verdichtet. Zur Herstellung der 50 Stück Pfeifenlöcher kamen Holzpflöcke mit einem Durchmesser von 28 mm zum Einsatz. Nach erfolgter Ansteifung der vorgefertigten Lochtenne an der Luft wurden die vier Einzelteile auf die Ofenwand und Mauerzunge aufgelegt, die Fugen mit Lehm verschmiert und verdichtet (Taf. IX,₁).

Als zusätzliche Unterstützung erhielt die Tenne Stempel aus Holz (Taf. IX,₂). Danach wurde in der Höhle getempert, wobei die Stempel verbrannten. Der Aufbau des konisch geformten Schürhalses mit den inneren Abmessungen

Länge	=	1150 mm
Breite vorn	=	520 mm
Breite hint.	=	720 mm
Höhe vorn	=	370 mm
Höhe hint.	=	450 mm

erfolgte mittels Weidenrutengeflecht (Taf. X,₁) (Maße der Ruten: L 1600, Ø 20 mm) und darüber, als Auflage für Ziegel und Lehm dienend, Sackleinen. Bei der Bauausführung ergaben sich geringfügige Abweichungen. Sie werden bei der nachfolgenden Betrachtung nicht berücksichtigt. Die obere Wölbung des Weidengeflechtes wurde am Ende auf die vorhandene Tenne aufgelegt und die seitlichen Enden der Weidenruten in die Lehmwandung eingebunden.

Parallel zum schichtenweisen Auftragen von Lehmziegeln (10 Stück zu je 100 mm x 190 mm x 220 mm) und Lehm auf den Schürhals erfolgte das Setzen der 1. Schicht der Ofenwandung mit Ziegeln auf die Lochtenne (Taf. X,₂). Dazu wurden für den Innenkreis 31 Stück (25 mm x

130 mm x 100 mm), für den Außenkreis 40 Stück (40 mm x 140 mm x 100 mm) benötigt. Auftretende Trockenrisse an der Tenne und am Schürhals wurden mit Lehm des Rohstoffes 1 verschmiert und verdichtet. Ein anschließendes Tempern ließ das Weidengeflecht abbrennen.

Die erste Schicht von auf der Mündung stehenden Wölbtopfen wurde in die mit Rohstoff 1 ausgefüllte 1. Schicht der Ofenwandung eingedrückt. Ab zweite Schicht sind die Wölbtopfe stets mit der Mündung nach unten auf den Boden der bereits feststehenden Wölbtopfe, nach innen neigend, aufgesetzt (Taf. XI,₁), so daß bis zu einer Höhe von 980 mm eine Kuppel entstand. Am Abschluß der Kuppel blieb eine Öffnung von 120 mm Durchmesser frei, welche als Rauchabzug diente.

Ab zweite Wölbtopfschicht wurde eine Öffnung am hinteren Teil des Ofenmantels zum Setzen und Entleeren des Brenngutes freigelassen (Taf. XI,₂; XII,_{1,2}). Die Maße der Einsatzöffnung betragen 660 mm H, 570 mm bis 180 mm Br von der 2. bis zur 12. Wölbtopfschicht.

Um Dichtheit und Stabilität der Kuppel zu garantieren, erfolgte nach dem Setzen einer jeden Schicht von Wölbtopfen das Verschmieren dieser zur inneren und äußeren Brennraumwandung. Der elliptische Ofenmantel besteht aus 13 Wölbtopfschichten (Tab. 4).

Tab. 4.

Schichten	Höhe	Wandungsstärke	Lichte Weite
1. - 6.	600 mm	240 mm bis 160 mm	1300 mm bis 1180 mm
7. - 13.	380 mm	240 mm bis 100 mm	1050 mm bis 120 mm

Insgesamt wurden 210 Wölbtopfe verbraucht. Als Rauchgasregelorgan fungiert ein Wölbtopf, der in den Rauchgasabzug eingesetzt bzw. abgenommen wird. Im Ofenmantel sowie im Schürhals wurden zur meßtechnischen Überwachung Einsatzöffnungen für das Einbringen von Thermoelementen vorgesehen. Nach Fertigstellung des Töpferofens (Taf. XIII,_{1,2}) erfolgte ein nochmaliges Tempern, alle sichtbaren Trockenrisse wurden wiederum mit gemagertem Lehm des Rohstoffes 1 verschmiert und verdichtet. Die berechneten Raum-, Volumen- und Flächenangaben des Töpferofens sind aus den nachfolgenden Tabellen 5 und 6 ersichtlich. Tabelle 7 gibt aus Tabellenwerken gezogene konstante Stoffwerte wieder.

Tab. 5. Volumen und Masseangaben des zum Einsatz gelangten Rohstoffes (Bruttowerte).

Ofenteile	Volumen (m ³)	Masse (t)
1. Ofensohle	1,16	2,3
- Hölle	0,75	1,5
- Schürhals	0,41	0,8
2. Mauerzunge	0,11	0,2
3. Ofenfundament	1,08	2,1
4. Schürhals	0,26	0,4
5. Tenne	0,25	0,5
6. Ofenmantel	0,62	1,1
		6,6
		=====

Tab. 6. Raum- und Flächenangaben.

1. Raumangaben (Bruttowerte): Feuerkeller (Hölle) 0,465 m³
 Brennraum 0,733 m³
 Schürhals 0,12 m³

2. Flächenangaben (Bruttowerte): Feuerkeller (Hölle) 1,13 m²

Brennraumfläche 1,9 m²

Schürhals 0,7 m²

Rauchabzug 0,01 m²

3. Flächenangaben (lichte Maße): Feuerkeller (Hölle) 0,9 m² (ohne Mauersteg)

Mauersteg (eine Flächenseite) 0,5 m²

Brennraumfläche (Tenne) 1,1 m²

Pfeifen (50 Stück) 0,03 m² (errechnet aus 6 % linearer Schwindung)

Schürhalseingang 0,13 m²

innere Wandfläche ab Höhe OK Ofensohle
bis UK Rauchgasabzug 4,4 m²

Tab. 7. Konstante Stoffwerte (n. Günther 1974; Quak 1955)

Spezifisches Gewicht: Lehmiges Erdreich $\gamma = 2000 \text{ kg/m}^3$ (Sohle)

Lehm gestampft - gemagert $\gamma = 1800 \text{ kg/m}^3$ (restliche Ofenteile ohne Wölbtopfe)

Wärmeleitzahl: Ofensohle

$\lambda = 1,1 \text{ W/mK}$

Übrige Ofenteile ohne Wölbtopfe

$\lambda = 0,8 \text{ W/mK}$

Übrige Ofenteile mit Wölbtopfen

$\lambda = 0,6 \text{ W/mK}$

Spezifische Wärme: Ofensohle

$c = 1300 \text{ kJ/KgK}$

Übrige Ofenteile

$c = 1300 \text{ kJ/KgK}$

3.3. Herstellung der Töpferware

Wie beim Ofenbau wurde auch beim Nachdrehen der Gefäße für den Rekonstruktionsbrand von der Maxime ausgegangen, die Bedingungen der Originalsituation weitestgehend einzuhalten. Proben und Originalscherben wurden einer naßchemischen und einer Röntgenfluoreszenzanalyse unterzogen. Dies führte zur Auswahl von Rohtonen aus der unmittelbaren Nachbarschaft der Öfen.

Die Rohtone entstammen sowohl dem Keupervorkommen am Grabungsplatz, d. h. an der Produktionsstätte selbst, als auch einem Anschnitt in unmittelbarer Nähe der Töpferei am Abhang des Weinberges (im Volksmund Rückberg genannt) an der Stelle des heutigen Silos der LPG Thörey in etwa 250 - 300 m Entfernung von der Grabungsstelle.

Seidel (1962, S. 61 f.) hat die Tone des unteren Gipskeupers (mittlerer Keuper) nach Plastizitätsbestimmungen und Ermittlung der Enslinwerte als noch plastisch bis mittelplastisch eingestuft. Verwertbar sind jedoch nur die sogenannten bunten Folgen dieser Keuperschicht, die keine Gipseinlagerungen enthalten. Die vergleichbare Wasseraufnahme der aus diesen Rohtonen gebrannten Produkte (Bau- und Grobkeramik) liegt bei Brenntemperaturen um 900 °C zwischen 15 und 25 %; selbst bei Temperaturen um 1000 oder 1100 °C ergeben entsprechende Analysen noch 10 - 25 % Wasseraufnahme (Seidel 1962, Bild 30, Tab. I). Die Keupertone von Haarhausen sind daher bei entsprechend selektivem Abbau und bei entsprechender Aufbereitung durchaus drehbar für Töpferwaren.⁹

Von den Rohtonproben wurde jener rotbraune Rohton 1 aus dem Abhang des Weinbergs beim Silo als besonders günstig erkannt. Eine Entscheidungshilfe stellten die übereinstimmenden Masseanteile für Fe₂O₃ bei annähernd 6 % und für Al₂O₃ bei durchschnittlich 20 % dar.

Der ausgewählte Rohton von Haarhausen wurde getrocknet, zerkleinert, auf Korngröße $< 0,2$ mm geschlämmt und mit Wasser angemischt bis eine form- und drehbare Masse entstand.⁷ Die daraus hergestellten Gefäße wurden an der Luft getrocknet, bis auf eine Sorptionsfeuchte zwischen 3 und 6 %.

Aus diesem Ton wurde für den ersten Versuchsbrand am 14. - 17. 10. 1981 nach Vorlagen der rekonstruierten Gefäße aus 69 kg aufbereitetem Ton sechs bauchige Gefäße (Dm 31; H 27 cm), 16 Krüge (Dm 16 cm; H 24 cm), 10 Reibschalen (Dm 30; H 7 cm) und 11 kleine Schalen (Dm 19; H 9 cm) gedreht.¹⁰

Der erste Rekonstruktionsbrand bestätigte hinsichtlich der Rohstoffauswahl den Qualitätsnachweis. Ein Vorversuch im Hydritofen in Niedertopfstedt erbrachte außerdem den Nachweis für die Nutzbarkeit des Haarhäuser Tones für einen reduzierend-hydrothermalen Brand mit dem Endergebnis einer grauen Keramik beim Abbrennen in einer Kapsel, d. h. bei Sauerstoffausschluß auch in der Kühlphase.

Aus Haarhäuser Ton - in gleicher Weise aufbereitet wie für das Einsetzgut des ersten Versuchsbrandes - wurden auch die Wölbtopfe gedreht; für 100 Exemplare verwendete man ca. 100 kg aufbereiteten Ton. Ihr Brand erfolgte im Hydritofen im Ziegelwerk Niedertopfstedt.¹¹ In hydrothormaler Brennatmosphäre lag die maximale Garbrandtemperatur zwischen 725 und 750 °C bei einer Brenndauer von 10 bis 11 Stunden.

Gefäße für den folgenden zweiten und dritten Versuchsbrand wurden zur Erleichterung der Tonaufbereitung aus Niedertopfstedter Keuperton gedreht¹², da dieser in seinen wesentlichen chemischen und brenntechnischen Merkmalen und Parametern dem Haarhäuser Ton adäquat ist, außerdem während der weiteren Brennversuche die Eruierung der Brandführung das Hauptforschungsziel war. Rohmaterial aus der Niedertopfstedter Tongrube wurde bei 110 °C bis zur völligen Trockenheit getrocknet, im Backenbrecher grob zerkleinert, durch die Schlagstiftmühle mit Sieb von 1 bis 1,5 mm Öffnungen geschüttet und das entstandene Pulver dann im Knetmischer zu drehfähigem Ton aufgeknetet. Formvorlagen waren in der Regel wiederum die aus dem Fundmaterial von Haarhausen rekonstruierten Gefäßtypen, überwiegend Krüge.

Als Ofenfüllung des vierten Versuchsbrandes dienten Gefäße aus Niedertopfstedter Ziegelton, der wiederum entsprechend der Orientierung dieses Brandes auf Fragen der Brenntechnik und Atmosphärenführung nicht besonders aufbereitet wurde. Seine Drehbarkeit für Gefäße wurde lediglich durch einen höheren Wassergehalt als beim Ziegelformen erreicht. - Auch für den 5. Brand wurden die Gefäße aus aufbereitetem Ziegelton von Niedertopfstedt hergestellt.

4. BRENNVERSUCHE IM TÖPFEROFEN

4.1. Versuchsdurchführung

In den Jahren 1981 - 1984 wurden in dem rekonstruierten Töpferofen fünf Versuchsbrände durchgeführt, die als Versuchsbrand Nr. 1 bis 5 bezeichnet werden. (Tab. 8)

Die Durchführung der einzelnen Brände erfolgte im wesentlichen immer nach dem gleichen Schema:

- Vorbereitung des Ofens
 - . z. B. Ausbesserungen von Schäden wie Verschmieren von Rissen
 - . Installation der Meßtechnik
 - . Zubereitung des Brennmaterials (Taf. XIV,₁)
 - . ggf. Tempern des Ofens im unbesetzten Zustand
 - . Probenkennzeichnung

Tab. 8. Stoffliche, erzeu- und verfahrenstechnische Angaben zu den Versuchsbränden.

	1. Brand	2. Brand	3. Brand	4. Brand	5. Brand
Datum	14.-17.10.81	25./26.5.82	8./9.7.82	17.-19.6.83	23./24.5.84
Rohstoff					
. Herkunft	Haarhausen-Wein-	NT (Zierziegel-	NT (Ziegelton)	NT (Ziegelton)	NT (Ziegelton)
. Typ	berg (Silo)	ton)	- grün. Horizont		
. Aufbereitungsart		getrocknet, zerkleinert	- Lettenköpfenkeuper wie für Ziegel	wie für Ziegel	wie für Ziegel
Brenngut					
. Art und Anzahl	19 Gefäße	70 Gefäße	110 Gefäße	126 Gefäße	65 Gefäße + 35 kl. Souvenirs
. Besatzschema	18 Wenko locker, z.B. gekapselt + ge- bördelt	s. 1. Brand	locker, einige Kapselung	locker, einige als Stapel oder gekapselt	locker
. Brenngutmasse	155 kg	69,35 kg \approx 70 kg	105,81 kg \approx 106 kg	99,04 kg	94 kg
. Masseverlust in %	-	10	13	-	-
. Ofenauslastung in Vol.	50 %	60 %	75 %	85 %	66 %
Brennstoff					
. Art	Buchenholz	Buchenholz	Buchenholz	Buchenholz	Buchenholz
. Verbrauch	924 kg	713 kg	660 kg	650 kg	792 kg
. spez. Energieverbrauch in GJ/kg Brenngut	0,11	0,22	0,12	0,11	0,15
Vorbehandlung des Ofens	lfd. Verschmieren der Trocknungs- risse	Verschmieren u. Verdichten der Risse	Ausbesserung der Ofenwandung und Tenne	- Blech auf vord. Tenne - Verschmieren d. ges. Ofenmantels mit Kalkmörtel bei Kühlbeginn	- Verstärkung der Lochtenne durch Metallstäbe - Aufschüttung v. Lehm an Schür- hals bis beg. Rundg.u.Höhe - Kalkhaut nein
. Bauliche Änderungen					
. Tempern ja / nein	ja	ja	nein	ja	nein
. Temperzeit	14 h				
. Tempertemperatur	800 °C				
Brennen					
. Anfangstemperatur im Brennraum	100 °C (85)	40 °C (78)	20 °C	50 °C	20 °C
. mittl.max.Brenntemp.	705 °C	710 °C	695 °C	690 °C	695-750 °C
. Aufheizzeit	22 h (20)	20,5 h (20)	20,5 h	33 h	26 h
. Haltezeit	2 h	1 h	0	0,5 h	1,5 h
. Oberflächentemp. der Ofenwandung	120 °C (Schürhals)	120 °C (Schürhals)			
(bei Garbrandtemperatur)	110 °C (Sch./Br.)	110 °C (Sch./Br.)			
	90 °C (Kuppel)	90-110 °C (Kuppel)			
Kühlung					
. Art	natürlich	Wasserkühlung	Wasserkühlung	natürlich	natürlich
. Dauer	49 h	5 h m. H ₂ O + 4 h natürlich	10 h	36 h	26 h
. Öffnung d. Ofens bei	200 °C	280 °C	\sim 80 °C	\sim 80 °C	200 °C
Brennergebnis					
. Brennbruch	keinen	keinen	9 % mit Beschä- digung durch HK und H ₂ O	keinen	keinen
. Farbe d.gebr.Gefäße	lederf.-reoxyd.	lederf.-reoxyd.	lederf.-reoxyd.	ca. 40 % red., 60 % lederf.- reoxyd.	überwiegender Teil grau, einige schwach oder reoxyd.
. Besonderheiten	einige mit Ruß- partikeln				
. Rückstände - Hölle	HK + Asche (0,03 m ³)			25 kg HK	

- Besetzen des Ofens mit Brenngut
- Verschließen der Einsatzöffnung mittels Wölbtopfen und Verschmieren mit Lehm
- Zünden des Ofens unter Verwendung von trockenem Reisig und Spänen
- Aufheizen des Ofens
 - . "Schmauchen" mit Laub und grünem Gesträuch
 - . Auflegen weniger Holzscheite
 - . Regulierung des Feuers bzw. der Aufheizkurve durch unterschiedliches Auflegen von Holz und Ofenzugregelung mittels Wölbtopf in der Rauchgasabzugsöffnung
- Halten der maximalen Brenntemperatur
- Kühlung
 - . Beendigung des Auflegens von Holz
 - . Schürhalsöffnung mit Steinen verschlossen und diese mit Lehm verschmiert
 - . Rauchgasöffnung mit Wölbtopf verschlossen und dicht mit Lehm verschmiert
 - . Verschmieren von Rissen in der Ofenoberfläche
 - . Zwangskühlung mit Wasser oder natürliche Kühlung
- Öffnen der Einsatzöffnung und Entnahme des Brenngutes

1. Brand

durchgeführt vom 14. bis 17. 10. 81. Am Vortage des ersten Versuchsbrandes wurde ein Temperbrand realisiert. (Taf. XIV,₂) Dabei erreichte man nach 14stündigem Feuern eine Temperatur von 800 °C. Bei geöffnetem Schürhals, offenen Abzugs- und Einsatzöffnungen erfolgte die Kühlung; die Temperatur ging in 13,5 Stunden auf 85 °C zurück. Der Ofen gab an den Wänden trotz ständigen Temperns während des Baus noch Feuchtigkeit ab.

Auftretende Trocknungsrisse mußten verschmiert werden, sie waren jedoch an keiner Stelle des Ofens extrem ausgebildet. Der beschickte Ofen (Taf. XV,₁; XVI,₁) wurde mit einer Anfangstemperatur von 85 °C am 14. 10. 81 um 15.15 Uhr gezündet (Abb. 17). Als nach einer Aufheizdauer zwischen 13 und 18 Stunden nur noch ein Temperaturanstieg von 10 K/h zu erreichen war, wurde in der Einsatzöffnung der oberste Wölbtopf mit der beidseitigen Verschmierung herausgenommen. Danach konnte nach 21stündigem Aufheizen eine Garbrandtemperatur von 700 °C erreicht werden. Nach einer Haltezeit von zwei Stunden wurde der Ofen am 15. 10. 81 gegen 15.00 Uhr verschlossen und die Kühlphase eingeleitet. (Taf. XV,₂)

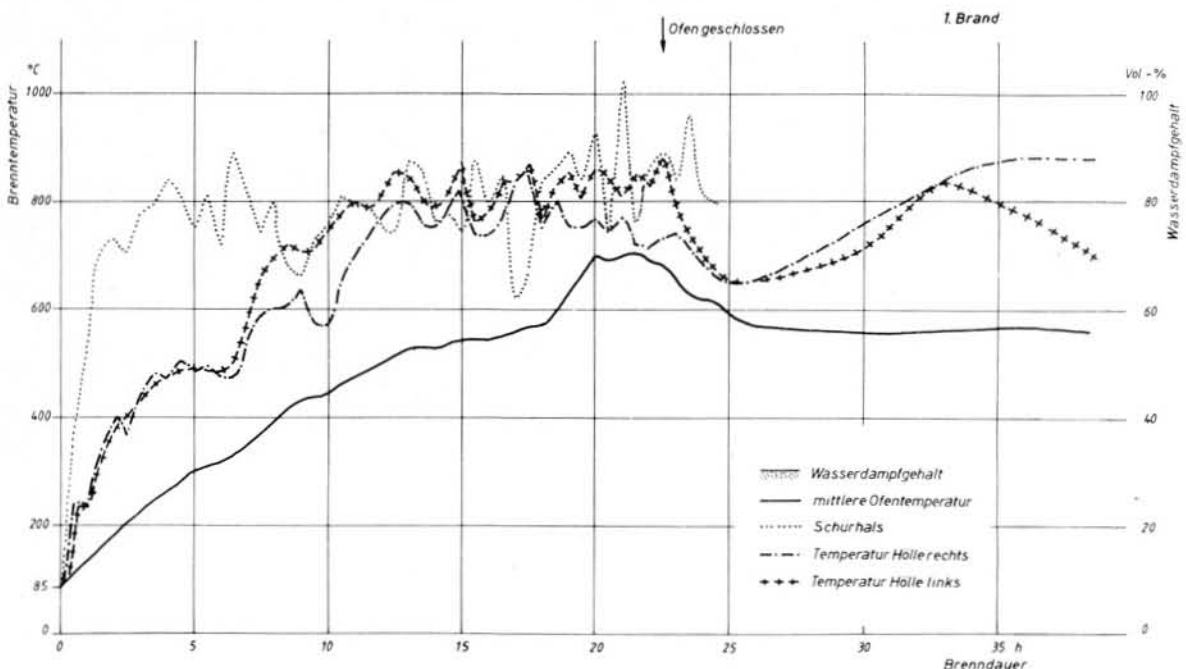


Abb. 17. Brennkurve, 1. Brand.

In 47 Stunden natürlicher Abkühlung war die Brennraumtemperatur auf $< 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ gefallen; erst nachdem der Schürhals geöffnet, Holzkohle und Asche herausgenommen und das Abdichtungsmaterial von Abzugs- und Einsetzöffnungen entfernt wurde, verlor der Brennraum innerhalb von zwei Stunden weitere $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, so daß das Einsatzgut nach 49 Stunden Kühlung bei $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ herausgenommen werden konnte. Die gebrannten Erzeugnisse waren lederfarben-reoxydiert gefärbt. Es trat kein Brennbruch auf (Taf. XVI,₂).

2. Brand

durchgeführt vom 25. bis 26. 5. 1982. Nach notwendigen Ausbesserungsarbeiten am Ofen, vor allem Verschmieren der Risse (Taf. XVII,_{1,2}; XVIII,₂) wurde der Ofen vor dem eigentlichen Brand getempert. Bei einer Resttemperatur von $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurde der Ofen am 25. 5. um 13.00 Uhr gezündet (Abb. 18). Bis zu einer mittleren Ofentemperatur von $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ erfolgte das Heizen nur im Schürhals. - Im Zeitraum der 6. bis 11. Stunde des Aufheizens (zwischen $320 - 350\text{ }^{\circ}\text{C}$) stagnierte die mittlere Brennraumtemperatur. Die in die Hölle geschobene Glut staute sich hier als Holzkohle. Erst nach der Herausnahme dieses "toten" Brennmaterials aus Hölle und Schürhals konnte beim Weiterheizen ein Ansteigen der Brennraumtemperatur bis maximal $710\text{ }^{\circ}\text{C}$ zur 21. Stunde des Aufheizens erreicht werden. Bei dieser maximalen mittleren Brennraumtemperatur wurde am 26. 5. um 9.30 Uhr der Rauchgasabzug durch Einsetzen des Wölbtopfes geschlossen. - Nach der Haltezeit von einer Stunde bei sicher reduzierender Fahrweise (Auflegen von frischen Holzscheiten, Flammen schlagen aus dem Schürhals), was entsprechende Gasanalysen der Ofenatmosphäre bestätigten (Abb. 19), wurde der Ofen gänzlich geschlossen (Taf. XX,₂; XXI,₂). Bei diesem Versuch erfolgte bis zu einer Temperatur von $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Kühlung ausschließlich mit Wasser, das durch ein an der Übergangsstelle von Schürhals zum Brennraum angebrachtes Rohr eingedüst wurde. (Taf. XX,₁; XXI,₁) Der Wasserverbrauch betrug schätzungsweise 1 hl. Nach diesen fünf Stunden Wasserkühlung wurde der Schürhals geöffnet, Holzkohle, Asche und Holzreste herausgenommen und die Abzugsöffnung durch Entnahme des Wölbtopfes geöffnet. Nach weiteren $3\frac{1}{2}$ Stunden natürlicher Kühlung bei zwar geschlossenem Brennraum, aber geöffnetem Schürhals und Abzug fiel die mittlere Brennraumtemperatur bis auf $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab und die obere Hälfte der Einsetzöffnung konnte geöffnet werden. - Die endgültige Leerung des Brennraumes und die Entnahme des Brenngutes (Taf. XVIII,₁; XIX,_{1,2}) erfolgte am 27. 5. bei einer Brennraumtemperatur $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das Brenngut war lederfarben-reoxydiert gefärbt, Brennbruch trat nicht auf.

3. Brand

durchgeführt vom 8. bis 10. 7. 82. Nachdem der Ofen ausgebessert worden war, d. h. Risse neu verschmiert (Taf. XXII,₁) und die Lochtenne versteift waren, konnte er mit ca. 110 Gefäßen (Taf. XXIII,_{1,2}) besetzt werden. Als Reduktionsmittel sollte die Wirkung von Holzkohle erprobt werden, daher wurde Holzkohle in einige Gefäße und zwischen andere in der linken Brennraumhälfte zugegeben oder verstreut. Am 8. 7. 82 konnte der kalte Ofen mit einer Ausgangstemperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ um 10.45 Uhr gezündet werden. Durch Entzünden der beigegebenen Holzkohle stieg nach dreistündigem Heizen die Brennraumtemperatur stellenweise um 200 K an, es machte sich außerdem durch ein Knallen im Ofen bemerkbar (Abb. 20). - Nach etwa 6stündigem Heizen blieb die Brennraumtemperatur um $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ hängen. Erst nach Herausnahme des Gefäßes aus der Abzugsöffnung stieg die Temperatur kontinuierlich an. Gefeuert wurde in dieser Phase in der Hölle (Taf. XXII,₂), wo sich diesmal ein Glutbett bildete mit einer bläulichen Flamme. Bei wieder eingesetztem Gefäß in der Abzugsöffnung schlugen Flammen und Rauch aus dem Schürhals. - Ab 3.00 Uhr am 9. 7., d. h. nach 16 Stunden Heizens, drangen aus der Abzugsöffnung brennbare Entgasungsprodukte des Buchenholzes (CO , H_2 , CH_4), die "abgefackelt" wurden. Die Brennbarkeit dieser Gase außerhalb des Brennraumes kann als Beleg für reduzierende Brennraumtemperatur gedeutet werden (Abb. 21). - Um 7.30 Uhr wurde bei einer mittleren Garbrandtemperatur von $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ der Ofen verschlossen. Nach etwa einer Stunde Haltezeit schüttete man durch die Abzugsöffnung je einen Eimer Rinde und Holzkohle. Nach anfänglicher natürlicher Kühlung wurden zunächst in halbstündigen Abständen je 8 l Wasser eingedüst. Nach ca. 3 Stunden erfolgte der Übergang zur kontinuierlichen Wasserkühlung,

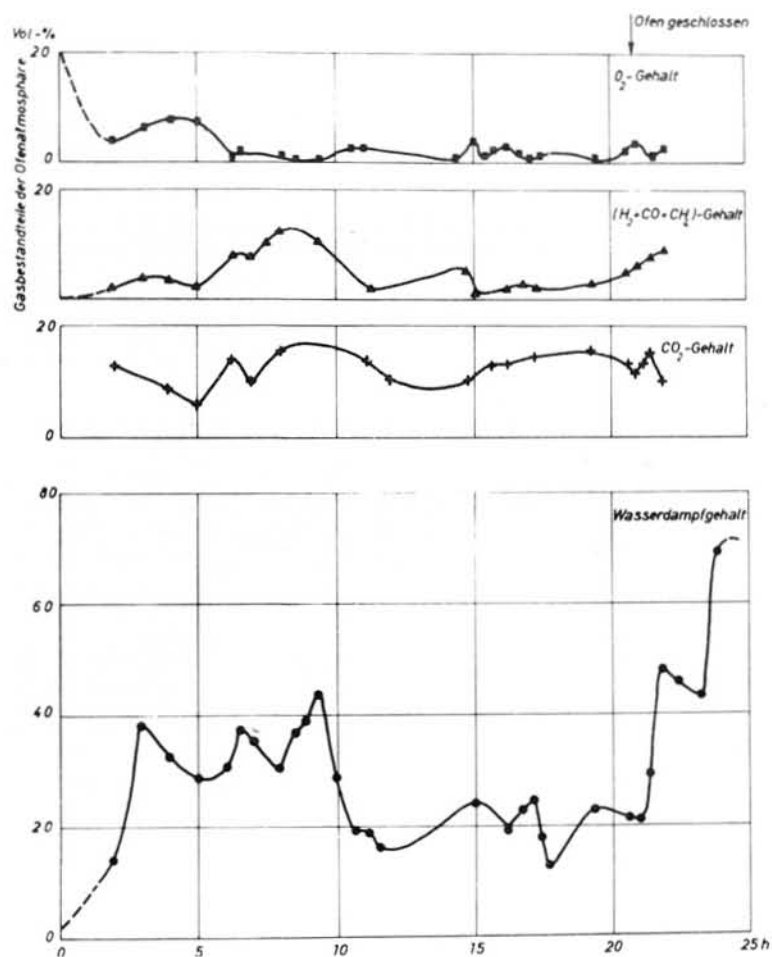
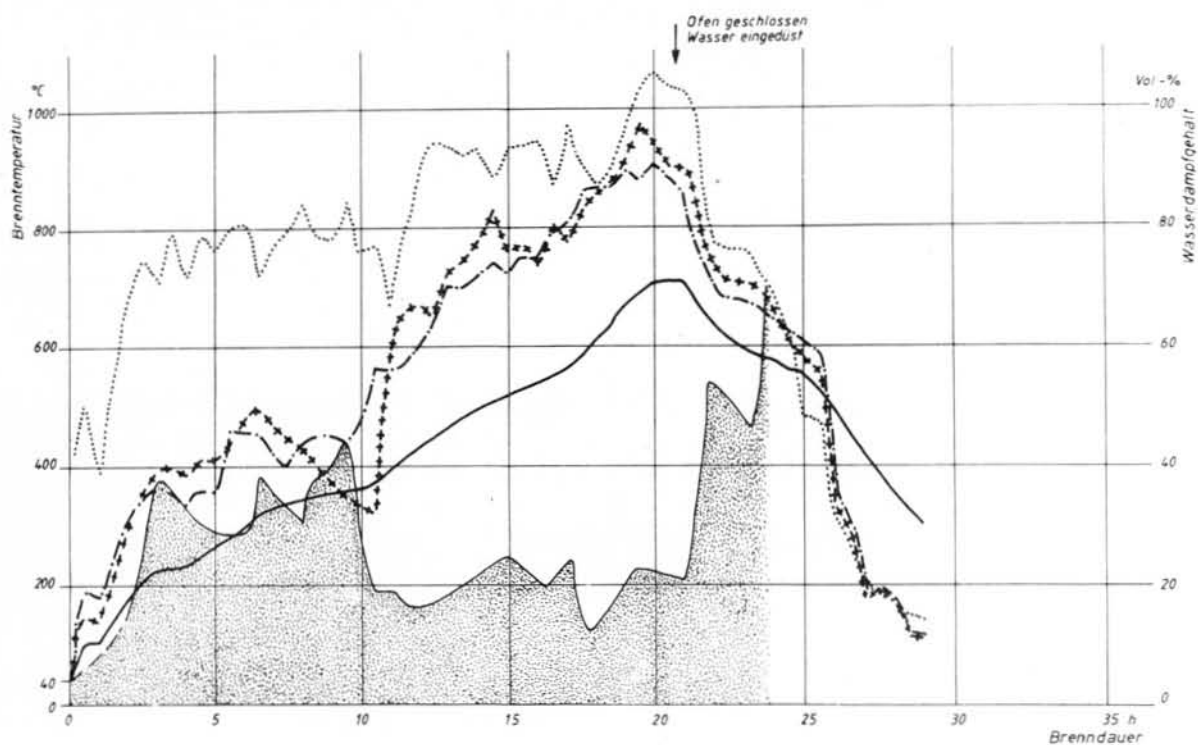


Abb. 18 und 19. Brennkurve und Zusammensetzung der Ofenatmosphäre, 2. Brand.

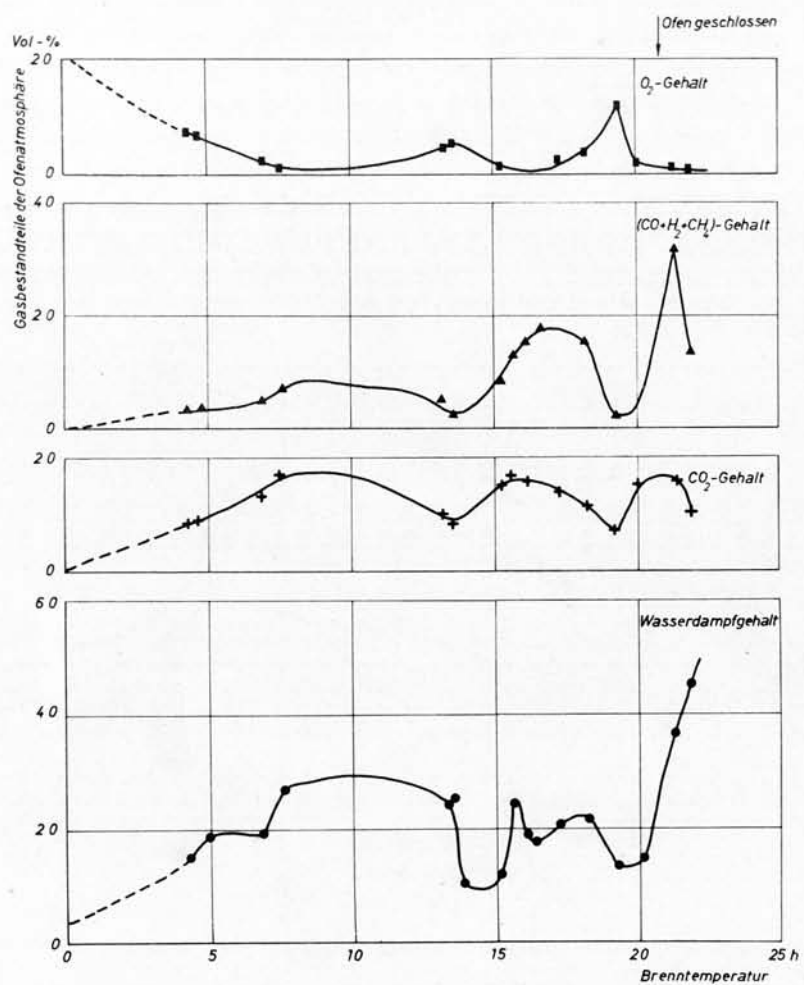
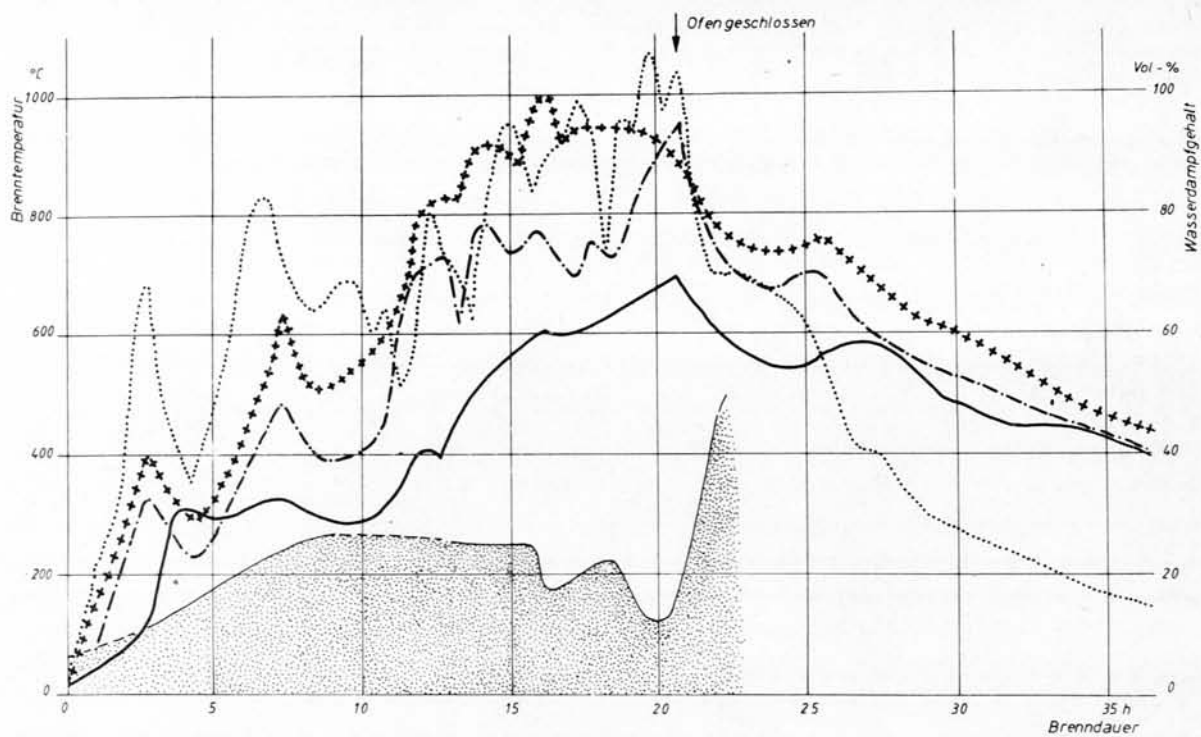


Abb. 20 und 21. Brennkurve und Zusammensetzung der Ofenatmosphäre, 3. Brand.

außerdem noch Zugabe von Kiefernspänen und Rinde. Das bewirkte eine gewisse Schmauchung, aber auch einen leichten Temperaturanstieg. Die Öffnung von Abzugsloch, Schürhals und Einsatzöffnung erfolgte bei $\sim 320^\circ\text{C}$. - Die Entleerung des Ofens geschah am 10. 7. 82 ab 10.45 Uhr. Die Produkte wiesen lederfarben-reoxydierte Färbung auf. 10 Gefäße der 110 Stück umfassenden Besatzmasse zeigten Risse an Rand, Boden oder Henkel, z. T. auch ganze Sprengungen, bedingt durch nicht ganz abgeschlossene Trocknung und durch das Entzünden der Holzkohle in der Aufheizphase.

4. Brand

durchgeführt vom 17. 6. bis 19. 6. 1983. Aufgrund stärkerer Schäden im linken vorderen Teil der Lochtenne mußte in diesem Teil ein Blech eingezogen werden, um die statische Belastbarkeit während des Brandes zu sichern. - Als vorbeugende Maßnahme gegen das Eindringen von Falschluff in den Brennraum wurde der gesamte Ofenmantel mit einem Kalk-Sand-Lehm-Mörtel (Taf. XXV, _{1,2}) bestrichen. Anfangs war das Mischungsverhältnis 1 : 2 : 7, später - während des Aufheizens und Kühlens - erfolgte wegen der besseren Verarbeitbarkeit des Mörtels eine Änderung der Anteile in 2 : 1 : 1. - Der mit 126 Gefäßen besetzte Ofen wurde nach einem Temperbrand bei Brennraumtemperatur von 50°C am 17. 6. 1983 um 17.06 Uhr gezündet. Bis zur 13. Stunde des Aufheizens konnte ein stetiger Temperaturanstieg im Brennraum von 40 K/h eingehalten werden (Abb. 22). Die erste Glut wurde nach etwa 10stündigem Feuern im Schürhals in die Hölle geschoben. Ab der 13. Aufheizstunde stieg die Brennraumtemperatur durchschnittlich nur noch um 10 K/h an und stagnierte nach 17 h bei etwa 520°C . Aus diesem Grunde mußte nach einer Aufheizzeit von 19 h die Holzkohle aus beiden Teilen der Hölle gezogen (Taf. XXVI, ₁) und zunächst wieder ausschließlich im Schürhals weitergefeuert werden. Erst nach einer Aufheizzeit von 29 h wurde wieder Glut in die Hölle geschoben und nach 33 h die maximale Durchschnittstemperatur von 695°C im Brennraum erreicht. Ab 580°C erfolgte laufend das Abfackeln der aus dem Rauchgasabzug entweichenden, brennbaren Gase, was wiederum als Beleg für die reduzierende Ofenatmosphäre herangezogen werden darf. Die Haltezeit betrug bei diesem Brand 0,5 h, so daß erst nach einer gegenüber den Bränden 1 - 3 um mehr als 13 h längeren Aufheizzeit der Ofen in der angegebenen Weise geschlossen werden konnte. - Im Gegensatz zu den vorangegangenen Bränden wurde vor dem Verschließen des Ofens zum Kühlen alle Holzkohle aus der Hölle und dem Schürhals gezogen. Damit sollten die bei den Bränden 1 bis 3 in der Kühlphase beobachtete mehr oder weniger starke Nachverbrennung bei Falschluffeinbrüchen und der damit verbundene nochmalige Temperaturanstieg im Ofen verhindert werden. Bei 390°C wurde der Schürhals und das Rauchgas-

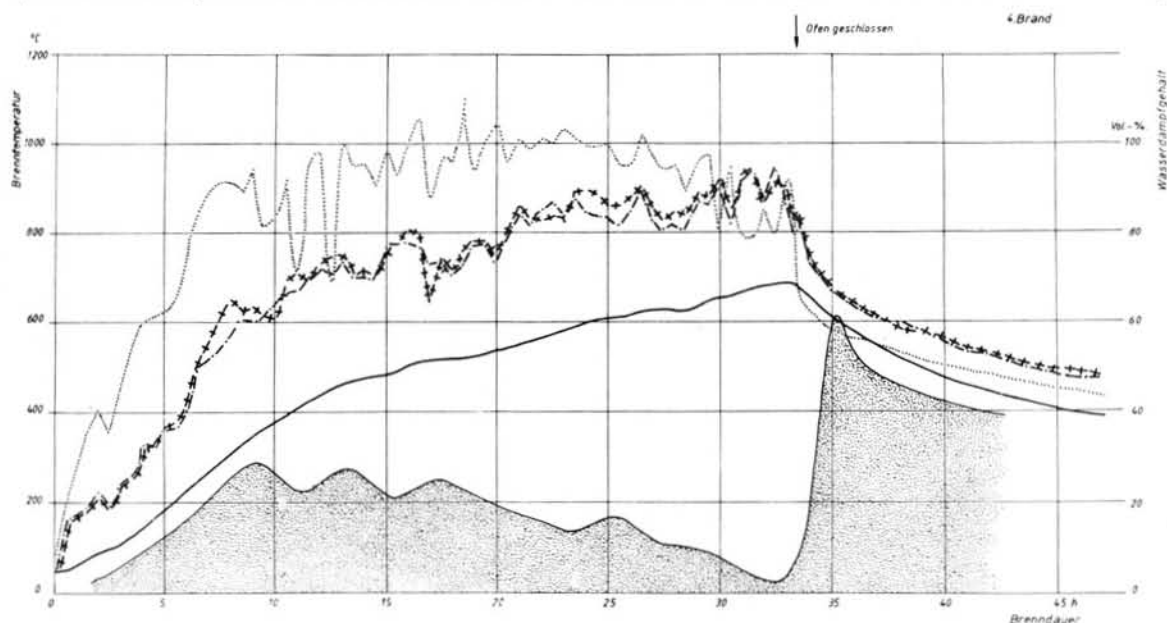


Abb. 22. Brennkurve, 4. Brand.

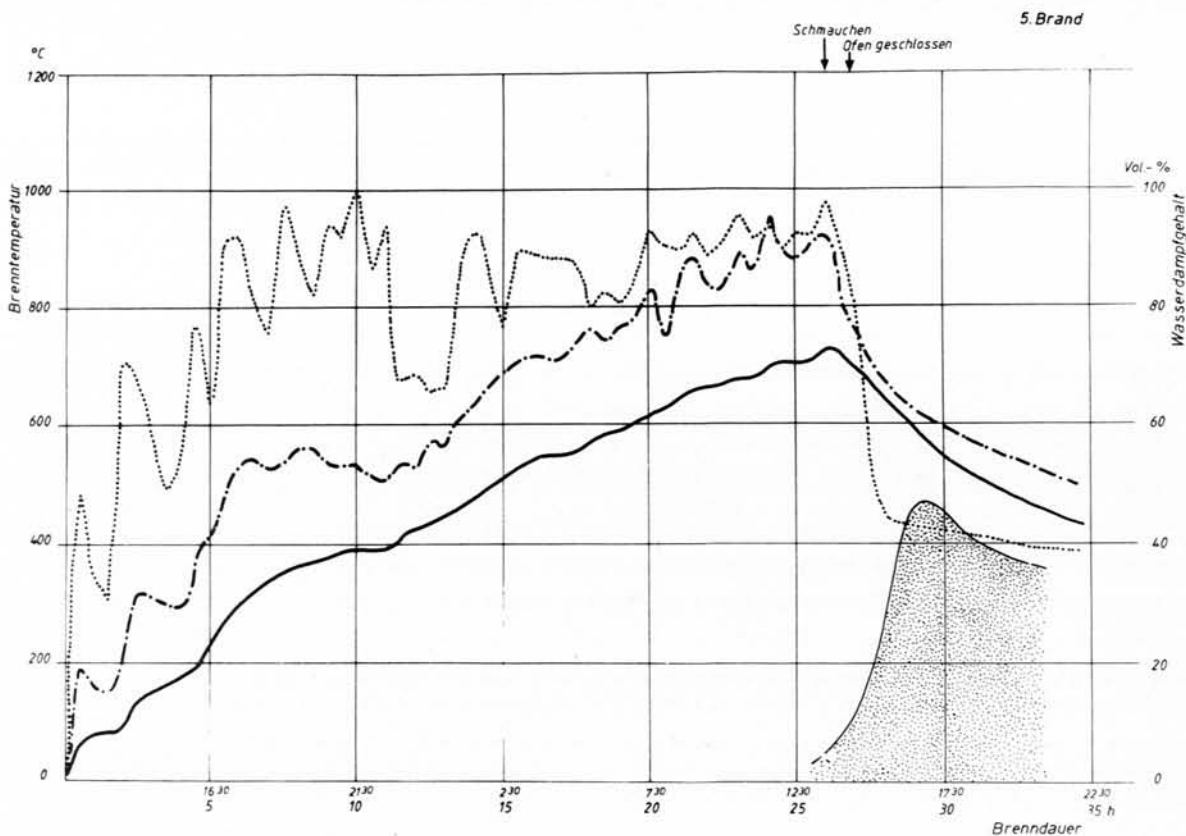


Abb. 23. Brennkurve, 5. Brand.

abzugsloch geöffnet und nach 36 h Kühldauer das Brenngut bei einer Ofentemperatur von 80 °C entnommen. - Das Brenngut (ohne Brennbruch) wies zu etwa 40 % graue Färbung auf, während 60 % wiederum lederfarbenen reoxydiert war.

5. Brand

durchgeführt am 23. und 24. 5. 1984. Vor dem Brand erfolgte zusätzlich zu dem vor dem 4. Brand auf dem vorderen Teil der Lochtenne angebrachten Blech eine statische Verstärkung des linken, vorderen Teiles der Lochtenne. Am Schürhals wurde bis zur beginnenden Rundung und am Ofenmantel bis in Lochtennenhöhe toniges Material aufgeschüttet (Taf. XXVI,₂; XXVII,_{1,2}). Die freibleibende Ofenoberfläche erhielt einen Kalkmörtelanstrich. - Das Zünden des Ofens erfolgte am 23. 5. 1984 um 11.30 Uhr ohne vorheriges Tempern des Ofens bei einer Ofenraumtemperatur von 20 °C. Gefeuert wurde von Anfang an nur im Schürhals, wobei das Holz möglichst kreuzweise geschichtet wurde, um eine gute Verbrennung und guten Zug zu gewährleisten. Es mußte dafür gesorgt werden, daß möglichst wenig Glut in die Hölle gelangte. Der Temperaturanstieg betrug von 20 bis 400 °C durchschnittlich 40 K/h, von 400 bis 550 °C ca. 30 K/h und von 550 °C bis zur Maximaltemperatur von 733 °C schließlich nur noch knappe 20 K/h (Abb. 23). Nach Erreichen der Maximaltemperatur wurde etwa 1 h lang geschmaucht, d. h. "grünes" Brennmaterial aufgelegt, um eine reduzierende Fahrweise in der Endphase zu sichern. Das Schmauchen hatte einen Temperaturabfall von 30 K zur Folge. Nach dieser Phase des Brandes wurde der Schürhals und die Rauchgasabzugsöffnung in der bekannten Weise geschlossen. Neben dem oben beschriebenen Aufbringen der Kalkhaut auf die Ofenoberfläche und dem Anschütten des tonigen Materials im unteren Ofenbereich wurde bei diesem Brand der gesamte Ofen zu Beginn der Kühlung vollständig mit Soden (frischen Grasstücken) dicht abgedeckt (Taf. XXX; XXXI), um so eine nachträgliche Reoxydation des Brenngutes

infolge von Falschlufteinbrüchen auszuschließen. - Bemerkenswert für diesen Brand ist weiterhin, daß es am 24. 5. zwischen 0.00 Uhr und 6.00 Uhr stark regnete, ohne daß der Ofen abgedeckt oder überdacht wurde. - Nach 26 h natürlicher Kühlung erfolgte bei einer Brennraumtemperatur von ca. 200 °C die Öffnung des Ofens und Entnahme des Brenngutes. Der überwiegende Teil des Brenngutes (65 %) wies graue Färbung auf, während 35 % schwach reoxydiert war und leicht lederfarbene Färbung zeigte.

4.2. Beschickung des Töpferofens

Die Beschickung des Ofens mit Brenngut erfolgte grundsätzlich durch die Einsatzöffnung (Taf. XXVIII₁), die nach Beendigung der Beschickung mit Wölbtopfen zugesetzt und beidseitig mit gemagertem Lehm verschmiert wurde.

Bei der Entscheidung der Besatzordnung mußte auf wenige Parallelbefunde archäologischer Komplexe und auf ethnographische Parallelen aufgebaut werden.

In Haarhausen sind die freistehenden Öfen nur in ihrem untersten Teil der Hölle erhalten, so daß Aussagen über die Einsatzordnung aus dem konkreten Grabungsbefund nicht gewonnen werden konnten. Der Teil einer Ofenfüllung lag in Baden bei Zürich vor, wo an Fehlbränden erkennbar war, daß Teller in Stapeln zu je sechs Stück im Ofen gebrannt wurden (nach v. Bülow 1975, S. 248). Aus der Füllung im Ofen II von Tropiszów bei Kraków wurden 92 Gefäße geborgen, sämtlich eiförmige Töpfe, für die keine genaue Kennzeichnung ihrer Lage im Brennraum überliefert ist (Reymann 1935, S. 166 ff.). Sie konnten, wie Wielowiejski (1960, S. 106) oder Wirska-Parachoniak (1980, S. 92) allgemein ausführten, gestapelt stehend gebrannt worden sein. Wahrscheinlicher aber war u. E. ihre lockere und liegende Anordnung im Brennraum, da eine solche Besatzordnung für diesen Gefäßtyp eher die maximale Ausnutzung des Brennraumes ermöglicht.

Recherchen von Hampe/Winter (1962, S. 100; 1965, S. 193 ff.) bei "Primitivtöpfern" in Kreta, Messenien und Zypern oder in Süditalien, Sizilien und Griechenland erbrachten hinsichtlich der Besatzordnung eine große Variationsbreite. Als ihre allgemeine Beobachtung galt: einsetzen so eng wie möglich. Teilweise wurden die Gefäße mit den Mündungen nach unten gesetzt, um eine gleichmäßige Erhitzung des Gefäßinneren zu garantieren und Brandrisse zu vermeiden. Auch Hinweise, daß auf der Mündung stehende Gefäße eine größere Last tragen können, sind deutlich. Große Vielfalt herrscht auch bei den Töpfern außerhalb des mediterranen Raumes. Klusch (1980, S. 80) überliefert für die siebenbürgische Töpferei als feste Besatzordnung den Brauch, kleinere Gefäße mit widerstandsfähiger Wandung unten anzuordnen und größere Gefäße darauf zu stellen. Nach Rada (1960, S. 151) ist für unglasierte Töpferware die Anordnung als gebördelte Gefäße in Säulenform optimal. Gebördelt standen auch bei den Versuchsbränden in Barton-on-Humber (Bryant 1977, S. 112, Abb. 37, 38) oder Benningen (Planck/Röske 1978/79, S. 140) die zu Säulen angeordneten Gefäße. Als Ringstapel angeordneten Besatz praktizierte auch Winter (1978, S. 26) bei seinen zahlreichen Rekonstruktionsbränden.

Bei den eigenen Brennversuchen in Haarhausen galten zwei Maximen:

1. Schaffung einer reduzierenden Brennatmosphäre durch entsprechende Füllung des Brennraumes
2. Ökonomische und optimale Ausnutzung des Brennraumes durch lockere Anordnung der Gefäße im Ofen, alle Hohlräume ausfüllend.¹³

Für den Versuchsbrand 1 wurden außer den 19 aus einheimischem Ton nachgedrehten Gefäßen 18 Rohlinge von Deckensteinen (Wenkos) mitgebrannt. Sie sollten einerseits eine maximale Belastung der Lochtenne garantieren, andererseits aber auch als Füllgut die Grundlage für die Schaffung einer hydrothermalen Brennatmosphäre durch den daraus austretenden Wasser-

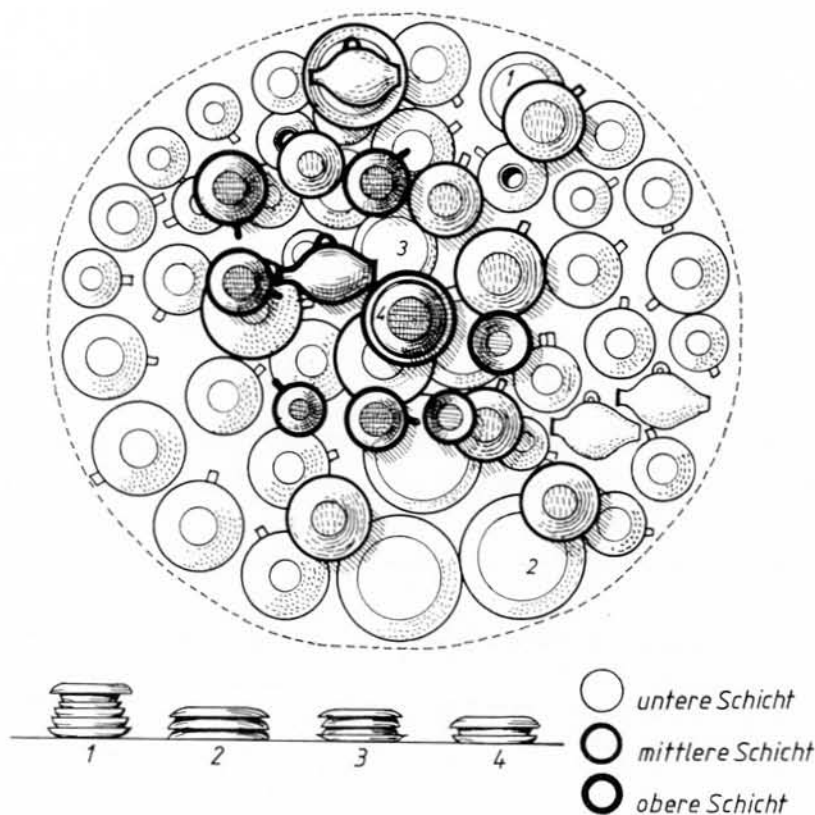


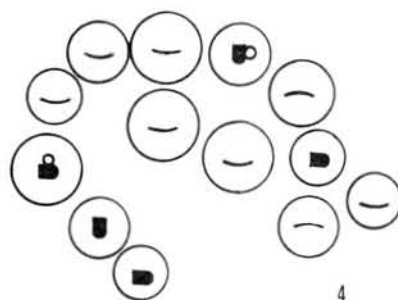
Abb. 24. Besatzschema, 2. Brand.

dampfpartialdruck bilden. 16 Deckensteine (Nr. 19-25, 27, 28, 32-34, 36-39) lagen direkt auf der Lochtenne auf, dazwischen standen in dieser untersten Schicht fünf Krüge (Nr. 26, 29, 30, 35, 40) und eine kleine Schale (Nr. 31 mit Probekörpern), die auf zwei Krügen etwas auflag (Taf. XVII_{1,2}),

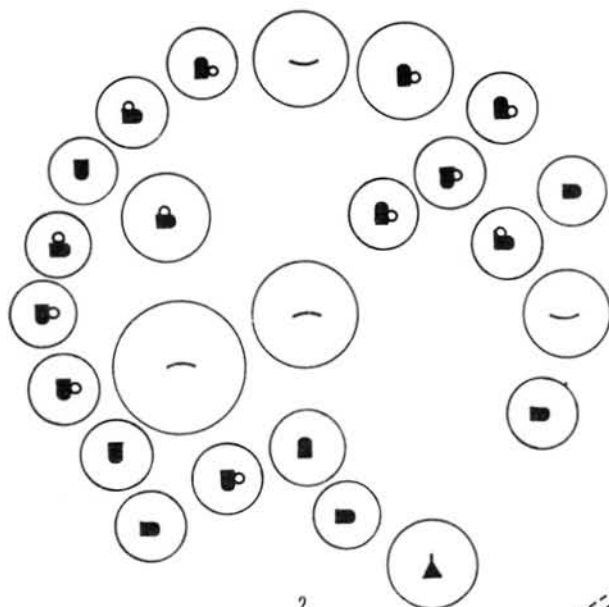
Beim Einsetzen galt verständlich der Grundsatz, die Lochtennenöffnungen nicht zu verstellen, damit ein reibungsloser Brennprozeß gewährleistet werden konnte. In der oberen Besatzschicht standen beiderseits der Einsatzöffnung noch je ein Deckenstein (Nr. 1; 2), in der rechten Brennraumhälfte befanden sich vier kleine Schalen (Nr. 5, 6, 7, 11, außer Nr. 6 alle mit Probekörpern) und eine Reibschale (Nr. 4 mit Probekörper) mit den Öffnungen nach oben auf den Deckensteinen. In der Mitte - über dem Steg - befanden sich auf den Wenkos zwei bauchige Töpfe: Nr. 3 mit Probekörper, Nr. 8 mit stehendem Krug Nr. 9, zwei Reibschalen mit den Mündungen nach unten (Nr. 13, 14) und eine Schale (Nr. 12). In der linken Brennraumhälfte stand eine Reibschale (Nr. 15) und lag ein Krug (Nr. 18). Das Gesamtgewicht der Einsatzmasse betrug 155 kg. Der Ofen war etwa zur Hälfte gefüllt.

Beim Versuchsbrand 2 wurde der Ofen mit ca. 70 Gefäßen beschickt, die ca. 60 % des Brennraumes auslasteten. Das Sortiment bestand wiederum überwiegend aus Krügen, Reibschalen, kleinen Schalen, zwei bauchigen Töpfen und drei kleinen Gefäßen mit versuchsweiser Engobe. Der Besatz erfolgte in drei Schichten (Abb. 24): In der untersten Schicht - direkt auf der Lochtenne aufliegend - befanden sich die Krüge (Nr. 14, 16-24, 26, 28-33, 35-39, 41-44, 46-54, 61), die bauchigen Töpfe (Nr. 55, 56) standen direkt über dem Steg, dazu die flachen Schalen (Nr. 2-10, 63-65). Die meisten Krüge waren auf die Mündungen gestellt. Damit wurde für sie eine Art "Muffelung" des Gefäßinneren erreicht. Andere Krüge befanden sich

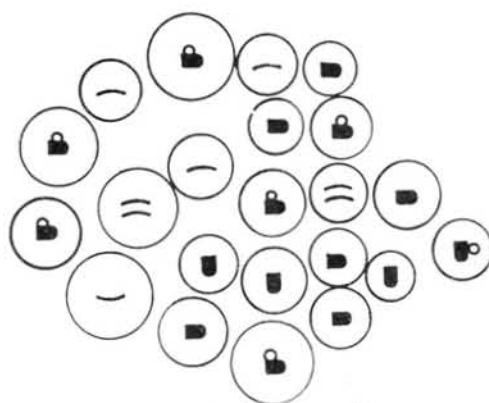
  	Krug (stehend, umgestülpt, liegend)
  	Becher, Vase " " "
 	Schale " "
 	Topf " "
 	Flasche " "



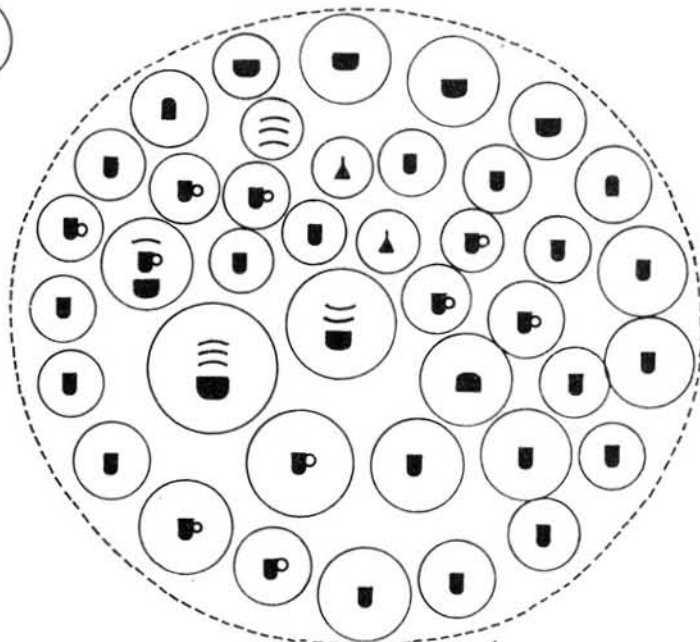
4



2



3



1

Abb. 25. Besatzschema, 3. Brand, nach vier Schichten getrennt.

in liegender Position, zwei von ihnen (Nr. 42, 51) unter den umgestülpten bauchigen Töpfen, d. h. sie waren "gemuffelt". Der Krug Nr. 61 war durch einen Lehmpfropfen in der Öffnung fest verschlossen. Die Schalen wurden in drei Stapeln eingesetzt: Nr. 2-4, 63-65 mit den Mündungen nach unten, Nr. 5-8, 10 mit den Mündungen nach oben; diese oberste Schale wurde durch Nr. 9 gebördelt, so daß der gesamte Stapel einen Abschluß besaß.

Die mittlere Schicht bildeten 10 Gefäße, die meist lose über der eben beschriebenen Schicht von Gefäßen eingesetzt waren, wie die Krüge Nr. 13, 25, 27, 34, 40, 45, 57 und der Napf Nr. 15. Die Schale Nr. 1 mit dem darin liegenden Krug Nr. 12 stand auf den Gefäßen.

Die oberste Schicht von eingesetzten Gefäßen bestand aus vier Krügen (Nr. 58-60, 62), liegend oder mit der Mündung nach unten, aus den beiden kleinen Gefäßen mit versuchsweiser Engobe und aus vier Reibschalen. Das Exemplar Nr. 66 lag mit der Mündung nach unten, die Exemplare Nr. 67-69 standen gebördelt, d. h. Nr. 68 und 69 wurden von Schale Nr. 67 abgedeckt (Taf. XVIII₁; XIX). Die Gesamtmasse des Einsatzgutes dieses Brandes betrug 69,35 kg.

Das Einsatzgut des Brandes 3 bestand aus 110 Gefäßen, die in vier Schichten gesetzt waren (Abb. 25). Diese und einige handgeformte Gefäße von Mitgliedern der AG Ur- und Frühgeschichte lasteten den Ofen zu ca. 75 % aus. In der untersten Schicht befanden sich 49 Gefäße. Die eingesetzten 10 Krüge (Nr. 35, 41, 45, 49, 53, 54, 56-58, 93) waren im wesentlichen stehend auf der Lochtenne angeordnet; nur Krug Nr. 49 war gekapselt sowohl durch einen Verschuß mit einem Pfropfen, als auch durch seine Stellung in einem bauchigen Topf (Nr. 62), der mit einer Schale (Nr. 63) abgedeckt war. Ebenfalls meist stehend waren hier 11 Faltenbecher (Nr. 1-4, 8, 10, 22, 24, 27-29), neun Vasen (Nr. 59, 94-99, 102, 104), zwei Flaschen (Nr. 80, 81) und vier Näpfe (Nr. 100, 101, 103 und 105) eingesetzt; letztere wurden alle durch Gefäße der zweiten Schicht abgeschlossen, die auf ihren Öffnungen standen. Die sich insgesamt in dieser Schicht mit vier Exemplaren befindenden bauchigen Gefäße (Nr. 60-62, 92) waren mit Ausnahme der Nr. 60 zur Aufnahme und Kapselung kleinerer Gefäße bestimmt: Der Topf Nr. 61 enthielt die Schalen Nr. 65 und 66; ihn deckte die gebördelt angeordnete Reibschale (Nr. 107) der 2. Schicht ab. Im Topf Nr. 62 befand sich der abgeschlossene Krug Nr. 49 mit Probekörpern; er wurde durch eine umgekehrt liegende Schale (Nr. 63) abgedeckt. Als Kapselungsgefäß diente auch der Topf Nr. 92, in dem die Schalen Nr. 68 und 87 standen - beide enthielten Probekörper und waren durch einen Lehmwulst dicht verschlossen. Gebördelte Reibschalen (Nr. 108, 109) schlossen die Mündung ab; die oberste gehört schon zur zweiten Gefäßschicht. Außer den schon in gekapselten Befunden erwähnten Schalen waren als Stapel die Schalen Nr. 83-85 eingesetzt.

Zur zweiten Schicht sind 24 Gefäße zu rechnen, die in sieben Fällen Gefäße der untersten Schicht abdecken. Von den sich insgesamt in dieser Schicht befindlichen 12 Krügen (Nr. 32-34, 36-38, 40, 43, 48, 50, 55, 110) - liegend, stehend oder hängend über der unteren Schicht eingesetzt - sind die Exemplare Nr. 38, 48 und 50 umgekehrt auf die Mündungen der Gefäße der 1. Schicht gesetzt; sie kapseln damit das Gefäßinnere ab. Zur Füllung dieser 2. Schicht gehören sieben Faltenbecher (Nr. 5, 9, 11, 13, 16, 23, 26), die überwiegend auf der untersten Gefäßschicht lagen. Zwei Reibschalen (Nr. 107, 108) dieser Schicht schlossen gekapselte Gefäßgruppierungen der untersten Schicht ab, ebenso die Flasche Nr. 82 und die Schale Nr. 106. Die zweite Schale dieser Schicht (Nr. 75) lag lose auf der untersten Schicht.

Die dritte Gefäßschicht bildeten 24 Gefäße. Sieben Krüge (Nr. 39, 42, 44, 46, 47, 51, 91) und neun Faltenbecher (Nr. 6, 12, 14, 17, 19, 20, 21, 25, 30) waren überwiegend liegend angeordnet. Die acht Schalen (Nr. 64, 67, 70, 72, 74, 77, 86, 90) lagen meist lose über der unteren Schicht; nur die Exemplare Nr. 86 und 90 bzw. 70 und 77 waren gestapelt.

Die oberste vierte Schicht bestand aus 13 Gefäßen, davon zwei Krüge (Nr. 31, 52), drei Faltenbecher (Nr. 7, 15, 18) und acht Schalen (Nr. 69, 71, 73, 76, 78, 79, 88, 89). Die Anord-

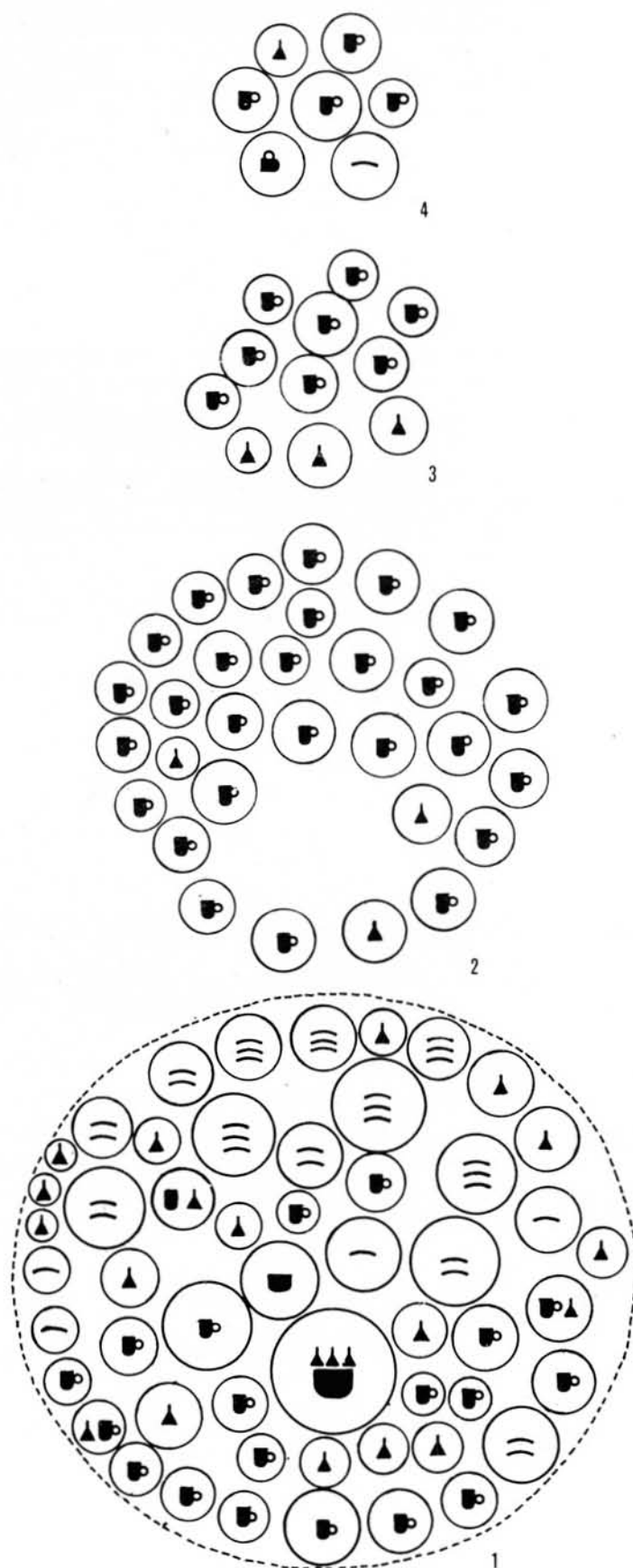


Abb. 26. Besatzschema, 4. Brand, nach vier Schichten getrennt. (Legende s. Abb. 25)

nung aller dieser Gefäße war überwiegend liegend (Taf. XXIII).

Probekörper waren in Gefäßen der untersten Schicht (Nr. 62, 68, 49, 27, 29, 59) und der dritten Schicht (Nr. 20, 64) verteilt. Zum Abtesten der Wirkung von Holzkohle als sauerstoffbindendes Material enthielten die Gefäße Nr. 59 und 61 der untersten und Gefäß Nr. 18 der obersten Schicht bestimmte Mengen davon. - Das Gesamtgewicht des Einsatzgutes beim 3. Brand betrug 105,81 kg.

Für Brand 4 war der Ofen mit 126 Gefäßen gefüllt; die Ofenauslastung betrug ca. 85 %. Sie waren in vier Schichten eingesetzt worden (Abb. 26). Die unterste Schicht bildeten 78 Gefäße. Die 18 Krüge (Nr. 7, 8, 10-12, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 26-28, 30, 96, 115, 124) befanden sich stehend oder auch liegend auf der Lochtenne. 34 flache Schalen (Nr. 5, 14, 55-64, 66-68, 70-77, 79-85, 87-90) gehören zum Einsatzgut dieser untersten Schicht. Sie wurden grundsätzlich umgekehrt, d. h. mit der Mündung nach unten, eingesetzt, die meisten als Stapel von zwei oder drei Exemplaren, wie 71, 74, 60; 59, 72, 89; 56-58; 61, 73, 76; 63, 80, 83 oder 62, 64, 79 sowie 66, 90, 68, 75; 70, 77 oder 5 und 81. Von den in dieser Schicht vorhandenen 21 flaschenförmigen Gefäßen (Nr. 35-46, 48-52, 65, 98, 100, 112) wurde die Mehrzahl zur Ausfüllung von Lücken benutzt, d. h. meist liegend oder mit der Mündung nach unten eingesetzt; die Exemplare Nr. 35, 45, 46 und 112 lagen sämtlich im Topf Nr. 126. Auch in dem einzigen Faltenbecher (Nr. 33) dieses Brandes lag eine kleine Flasche (Nr. 41). Zwei kleine Gefäße (Nr. 53, 54) dienten ebenso als Füllung, wie auch ein zweiter Topf (Nr. 110).

Die zweite Schicht bestand aus 30 Gefäßen, 27 Krügen (Nr. 1-3, 6, 9, 17, 20, 23-25, 29, 31, 32, 34, 92, 95, 99, 101, 103, 105, 107-108, 117, 120-123) und 3 Flaschen (Nr. 47, 86, 97). Beim Einsetzen dieser Schicht galt als einziger Grundsatz, den Ofenraum maximal auszunutzen, daher wurden diese Gefäße meist derart liegend angeordnet, daß Hohlräume ausgefüllt wurden.

Die dritte Schicht des Einsatzgutes bildeten acht Krüge (Nr. 69, 91, 93, 94, 104, 106, 116, 125) und drei Flaschen (Nr. 109, 111, 119). Sie befanden sich liegend auf den Gefäßen der zweiten Schicht. Die gleiche Anordnung wurde auch beim Einsetzen der 4. Schicht geübt für die fünf Krüge (Nr. 13, 102, 113, 114, 118), für Schale Nr. 78 und Flasche Nr. 4.

Probekörper wurden in der untersten Schicht in den Krügen Nr. 10, 21, 27, den Flaschen Nr. 30, 98, 112 und der Schale Nr. 60 mitgebrannt sowie im Krug Nr. 13 der obersten Schicht des Besatzgutes. Die Gesamtmasse betrug 99 kg.

Die Besatzmasse des 5. Brandes bestand aus 65 meist flaschenförmigen Gefäßen und ca. 35 kleinen Souvenir-Krüglein für die Teilnehmer des Keramiksymposiums. Der Ofen war etwa zu 2/3 seiner Kapazität ausgelastet. Gefüllt wurde er in 4 Schichten (Abb. 27).

Die unterste Schicht bildeten 30 Flaschen, stehend oder liegend auf der Lochtenne angeordnet (Nr. 33-39, 42-53, 55-65) und drei Töpfe (Nr. 40, 41, 54) stehend. Die entstandenen Zwischenräume wurden z. T. mit kleinen Souvenirkrügen gefüllt.

Die zweite Schicht bestand aus 21 Gefäßen, wobei die 19 Krüge (Nr. 5, 8-13, 15-18, 20-21, 23-24, 26-27, 31-32) wiederum liegend oder stehend über den Gefäßen der unteren Schicht angeordnet waren. Sämtliche Zwischenräume dieser Einsetzschicht, zu der noch zwei Töpfe (Nr. 29-30) in der Nähe der Einsetzöffnung gehörten, waren mit Souvenirkrügen ausgefüllt.

Die 3. Schicht war wegen Mangel an Besatzmasse nicht gleichmäßig beschickt, in der dem Schürhals zugewandten Hälfte des Brennraumes wurden acht Krüge (Nr. 3, 4, 7, 14, 19, 22, 25, 28) eingesetzt, darüber nochmals drei (Nr. 1, 2, 6) (Taf. XXVIII₂; XXIX₁).

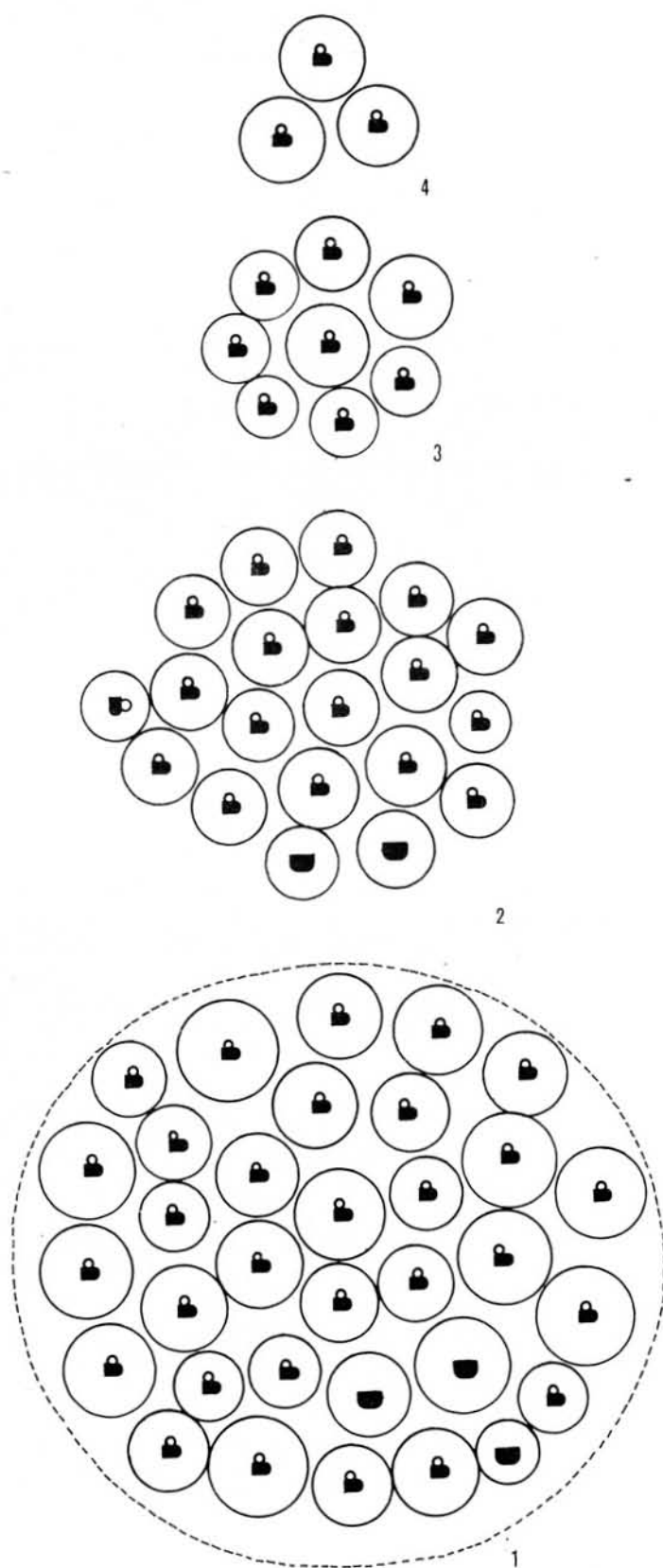


Abb. 27. Besatzschema, 5. Brand, nach vier Schichten getrennt. (Legende s. Abb. 25)

Probekörper wurden nur in der untersten Einsetzschicht verteilt, lose zwischen den Gefäßen liegend, so zwischen Gefäß Nr. 62 und 65, zwischen 55 und 60 und über die gesamte Tennenfläche verteilt. Die Gesamtbesatzmasse betrug 94 kg.

4.3. Feuerungstechnik

Brennmaterial war lufttrocknes Buchenholz. Es kam in Scheiten von 10 cm x 10 cm x 30 cm bis zu 20 cm x 20 cm x 100 cm zur Verbrennung. Zur Beurteilung und Berechnung des Verbrennungsvorganges wurden für dieses Buchenholz folgende Standardwerte angesetzt:

Feuchte	20 Masse-%
Asche	2 Masse-%
Flüchtige Bestandteile	65 Masse-%
Dichte	0,80 kg/dm ³
Heizwert Hu	18000 kJ/kg
Gasausbeute (als Sauggas bei absteigender Vergasung)	2,1 m ³ /kg
Heizwert des Holzgases	6000 kJ/m ³
Zusammensetzung des Holzgases	43 Vol.-% N ₂
	24 Vol.-% H ₂
	16 Vol.-% CO
	15 Vol.-% CO ₂
	2 Vol.-% CH ₄
Heizwert der Holzkohle	28000 kJ/kg

Die besondere Eigenschaft des Buchenholzes besteht darin, daß sich mit zunehmender Feuer- raumtemperatur beim Einbringen des Holzes dessen flüchtige Bestandteile schlagartig ent- binden und massutartig den Feuerungsraum ausfüllen. Bei reduzierender Brandführung verteilt sich die mit dem Holz eingebrachte Energie auf die drei Bilanzposten: Wärmeabgabe an den Ofen und an das Brenngut, Wärmeinhalt der den Ofen verlassenen Rauch- und Schwelgase und Wärmeinhalt der im Ofen als Feuerungsrückstand verbleibenden Holzkohle.

Die Feuerführung hatte die verfahrenstechnische Vorgabe zu realisieren, den Brand spätestens ab Brenntemperaturen von 450 °C eindeutig reduzierend zu fahren und eine Garbrandtempera- tur zwischen 700 °C und 800 °C zu erreichen. Als Hilfsmittel stand ein eiserner Schürhaken von 3,0 m Länge zur Verfügung. Die einzelnen Schritte der Feuerführung waren

- Sorgfältiges Aufheizen bis ca. 200 °C mit einer Aufheizgeschwindigkeit von max. 35 K/h⁻¹. In dieser Phase erfolgt die Resttrocknung des Brenngutes. Reguliert wird die Wärmezufuhr durch die Menge des angelegten Brennholzes im vorderen Teil des Schürhalses sowie durch teilweise verschlossenen Abgasabzug. Zur Milderung dieser "Trocknungsatmosphäre" wurden feuchtes Reisig sowie grünes Blattwerk dem Brennholz zugegeben.
- Ab 200 °C Brenntemperatur im Brennraum wurde maximal mögliche Aufheizung angestrebt. Da- bei erfolgte nach und nach das Verlagern der brennenden Holzscheite in die hintere Häl- fe des Schürhalses bzw. den vorderen Teil der rechten und linken Hölle. Die Holzscheite verbrennen dabei mit offener, gelber Flamme, die in die Hölle hereingezogen wird und teilweise durch die Löcher der Tenne in den Brennraum schlägt. Es bilden sich größere Mengen glühender Holzrückstände. Die Seitenwände des Mittelsteges und die hintere Wand- begrenzung der Hölle sind dunkel und von außen nicht sichtbar.
- Bei Brennraumtemperaturen zwischen 300 °C bis 500 °C bildet sich ein erster kritischer Punkt in der Feuerführung. Werden die glühenden und dabei langsam zerfallenden Holzrück- stände zu schnell vom Schürhals in die Hölle geschoben, so füllt sich diese mit dunkel- rot glühender Holzkohle immer mehr an, der Verbrennungsvorgang erstickt und die Ofentem- peratur bleibt hängen. Die sich bildende glühende Holzkohle muß sorgfältig am Übergang vom Schürloch zur Hölle abgebrannt und gleichzeitig mit der zunehmenden Erwärmung des Unterofens langsam in die Tiefe der Hölle geschoben werden. Erkennbar wird dieser Zustand durch die dunkelrote Färbung der Seitenwände der Hölle. Ist dieser Zustand erreicht, kön- nen auch größere Brennholzscheite in die rechte und linke Höllenkammer vorgeschoben wer- den. Verantwortlich ist offensichtlich der mit zunehmender Innentemperatur des Ofens an- steigende Ofenzug. Die vollständige Erwärmung des Unterofens ist für eine gute Brandfüh- rung unerlässlich.

- Bei Brennraumtemperaturen $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ kommt es bei jedem Einlegen eines Holzscheites in den glühenden Schürhals zu einer schlagartigen Entgasung des Buchenholzes. Schwarze, massenartige Schwelgase füllen den ganzen Unterofen und quellen aus der Abgasöffnung und dem Schürloch ins Freie. Die im Schürhals und der Hölle liegende Holzkohle phosphorisiert gelblich-weiß und brennt teilweise bis zur Asche ab. Die Wände des Unterofens glühen kirschrot und heller. Durch den Schürhals gesehen, kann der gesamte Unterofen in jedem Detail erkannt werden. Der mit zunehmender Brenntemperatur, genauer gesagt mit zunehmender Temperatur der inneren Ofenzustellung, stark ansteigende Ofenzug bewirkt das Austreten des ständig heißer werdenden Rauchgases aus der Kuppelöffnung mit steigender Geschwindigkeit.

Der Auftrieb einer vergleichbaren Gassäule von 1 m erreicht bei Außentemperaturen der Luft von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ für Temperaturen von $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Werte 4,1 Pa, 6,5 Pa, 7,7 Pa und 8,5 Pa. Bis zum Ende des Brandes verdoppelt sich also der Auftrieb des Ofenabgases! Bei Brenntemperaturen zwischen $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist das austretende Rauchgas brennbar und zündfähig. Es fackelt mit einer bläulichen bis zu 1,5 m hohen Flamme über der Ofenkuppel ab. In dieser Brennphase bietet das Abfackeln eine sichere Orientierung für die reduzierende Feuerführung. Im Temperaturbereich davor kann hinreichend sicher die reduzierende Fahrweise dadurch erreicht werden, daß das Nachlegen von Holz so erfolgt, daß die entstehenden Schwelgase den Ofenraum ganz ausfüllen und geringfügig aus dem Schürhals nach vorne abziehen. Im Ofen sind die Bedingungen einer Mischvergasung nach



sowie für den Abbau der Schwelgase zu den brennbaren Gasen H_2 , CH_4 , CO durch das Vorhandensein von glühender Holzkohle im Ofenbett, heißer Schwelgase im Ofenraum, O_2 als Vergasungsmittel aus der Luft und H_2O als Vergasungsmittel aus dem Brennstoff und dem Brenngut vorhanden. Die Brennatmosfera kann somit auch als wasserdampfangereichertes, verdünntes Generatorgas bezeichnet werden.

- Im Garbrandbereich zwischen $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden die mit dem Ofen möglichen Aufheizgeschwindigkeiten immer geringer. Die Brennkurve nähert sich asymptotisch einem Grenzwert, der bei dem unter Kap. 3.1. angegebenen festen geometrischen Verhältnissen der freien Öffnungen des Schürhalses, der Pfeifen in der Lochtenne und der Rauchgasabzugsöffnung in der Kuppel bei max. $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ für reduzierende Feuerführung liegt. Dieser Endwert ist begleitet von zunehmender Auffüllung der Hölle mit glühender Holzkohle bis hin zum Verstopfen des Feuerungsraumes und dadurch bedingten Absinken der Temperatur. Inwieweit eine Vergrößerung des freien Querschnittes der Lochtennenpfeifen und der Rauchgasabzugsöffnung eine Erhöhung des Temperaturendwertes möglich macht, wurde in den Versuchen 1 - 5 nicht erprobt. In Übereinstimmung mit den Angaben des Abschnittes 3.1. über das für reduzierendes Brennen erforderliche Flächenverhältnis von Pfeifen zur Abzugsöffnung sowie den praktischen Beobachtungen des Feuerfortschrittes im Ofen ist eine über $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ gehende Ofentemperatur für den reduzierenden Brand nicht zu erwarten. Sicher festgestellt werden konnte dagegen, daß bei oxydierender Feuerführung, d. h. bei erhöhter Luftzuführung mit Luftüberschuß im Feuerungs- und Brennraum, die Endtemperatur merklich erhöht werden kann.
- Nach Erreichen dieses sich selbst einstellenden Temperaturendwertes wurde der Schürhals und die Rauchgasabzugsöffnung sorgfältig mit Steinen bzw. Wölbtopfen und feuchtem Ton-Häcksel-Gemisch verschlossen und die Ofenkühlung begonnen.

Dieses Grundschema der Feuerführung wurde bei allen fünf Bränden eingehalten bzw. mußte eingehalten werden; es ergab sich aus Ofenkonstruktion und -proportionen.

4.4. Meßtechnische Überwachung der Brände

Mit der meßtechnischen Überwachung der Brände in dem rekonstruierten Töpferofen sollte die Einhaltung brenntechnischer Vorgaben kontrolliert und ein gesteuerter Brennverlauf gesichert werden. Als Orientierung für die Festlegung der Brennparameter in dem Töpferofen dienen entsprechend der Arbeitshypothese, daß die graue Fundkeramik unter Bedingungen gebrannt wurde, die denen des Hydritverfahrens adäquat sind, die im industriellen Ofen realisierten Parameter. Für den ersten Brand wurden folgende Zielgrößen festgelegt:

- Brenntemperatur 750 °C
- Brenndauer 20 h
- davon als
- . Aufheizzeit 12 h
- . Haltezeit 1 h
- . Kühlzeit 7 h

Da als Brennergebnis graue Keramik erreicht werden sollte, mußte durch brenn- und ofenbautechnische Maßnahmen gesichert werden, daß während des Brandes im Brennraum eine hydrothermal-reduzierende Ofenatmosphäre eingehalten wurde. Dies bedeutete, daß beim Aufheizen des Ofens ab etwa 450 °C bis zur maximalen Brenntemperatur, während der Haltezeit und während der Kühlung bis ca. 400 °C Sauerstoff im Brennraum des Ofens weitestgehend auszuschließen war. Für die sichere Charakterisierung der Brennatmosphäre war es weiterhin notwendig, neben den "trockenen" Gasbestandteilen

- | | | | |
|-----------------|-----------------|----------------------|---|
| - Sauerstoff | O ₂ | - Kohlenwasserstoffe | C _m H _n |
| - Kohlendioxid | CO ₂ | - Stickstoff | N ₂ |
| - Kohlenmonoxid | CO | auch den Gehalt an | |
| - Wasserstoff | H ₂ | - Wasserdampf | H ₂ O _D zu ermitteln. |
| - Methan | CH ₄ | | |

Weiterhin sollten die Zug-(Unterdruck-) bzw. Druck-(Überdruck-)verhältnisse im Ofen gemessen werden, um gegebenenfalls Falschlufteinbrüche festzustellen.

Die eingangs genannten Zielstellungen bestimmten die Auswahl der Meßgeräte und die gewählte Meßanordnung.

Die Übersicht der Tabelle 9 enthält die zu ermittelnden Meßgrößen und die verwendeten Meßgeräte einschließlich Zubehör.

Tab. 9. Meßgrößen und verwendete Meßgeräte (Taf. XXIV).

Meßgröße	Dimension	Meßgut und Zubehör
1. Temperaturen		
Ofenraumtemperatur	°C	NiCr-Ni-Mantelthermoelemente und
Brennguttemperatur	°C	Registrierung mittels Kompensa-
Schürhalstemperatur	°C	tionsbandschreiber für 12 Meß-
Höllentemperatur	°C	stellen
Ofenoberflächentemperatur	°C	Anlegepyrometer
2. Ofenatmosphärenzusammensetzung		Probenahme aus dem Brennraum mit-
		tels beheizter Probenahmesonde
H ₂ O-Dampf-Gehalt	Vol-%	Kondensatfalle (Glasrohrschlangen-
		kühler)
O ₂ -Gehalt	Vol-%	Rauchgas-Orsat
CO ₂ -Gehalt	Vol-%	Probenahme mittels Gassammelröh-
CO-Gehalt	Vol-%	ren ("Gasmäuse") und Auswertung

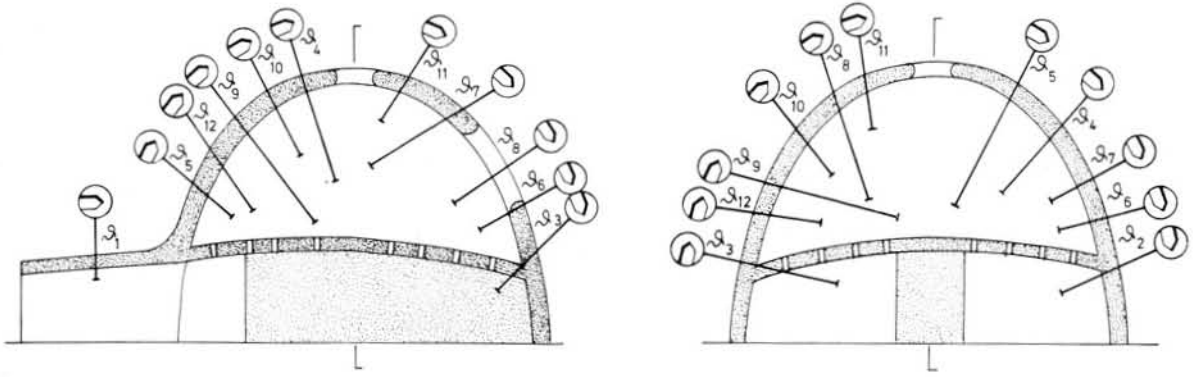
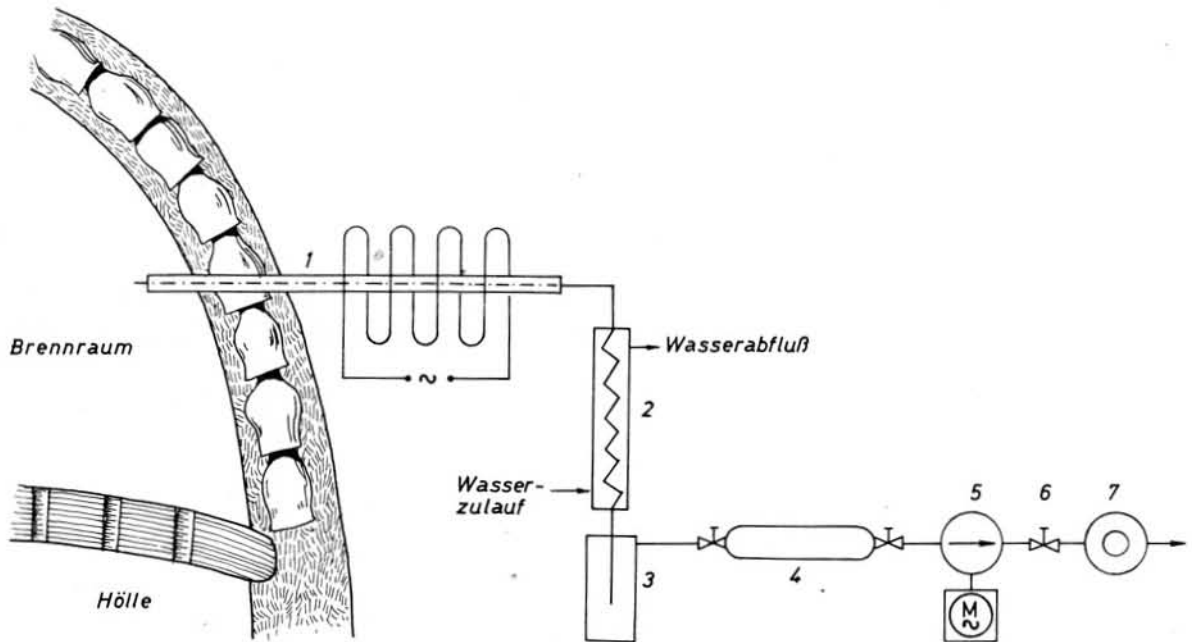


Abb. 28. Schematische Darstellung der Temperaturmeßstellen im rekonstruierten Ofen.



Meßanordnung für Gasanalyse und Wasserdampfbestimmung

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------|
| 1 Elektr. beheizte Gasprobenahmesonde | 5 Taumelscheibenpumpe |
| 2 Kühlschlange | 6 Drosselventil |
| 3 Kondensatauffanggefäß | 7 Gasuhr |
| 4 Gassammelrohr („Gasmaus“) | |

Abb. 29. Meßanordnung für Gasanalyse und Wasserdampfbestimmung.

Meßgröße	Dimension	Meßgut und Zubehör
H ₂ -Gehalt	Vol-%	mit Frischgas-Orsat, Gasuhr, Taumelscheibenpumpe
CH ₄ -Gehalt	Vol-%	
C _m H _n -Gehalt	Vol-%	
3. Druck		
Unterdruck (Zug)	Pa	Mikromanometer bzw. Schrägrohrmanometer
Überdruck (Druck)	Pa	

Die schematische Darstellung der Meßanordnungen für die Temperaturmessung und für die Ermittlung der Gasatmosphärenzusammensetzung zeigen die Abb. 28 und 29.

Die Temperaturmessung mittels 12 Stück NiCr-Ni-Mantelthermoelementen (Abb. 28) ermöglichte eine ausreichende Verteilung der Meßstellen im Ofen und sicherte auch beim Ausfall eines oder mehrerer Thermoelemente noch eine gute Aussagefähigkeit der Messungen. Mantelthermoelemente wurden deshalb gewählt, weil sie infolge ihrer Flexibilität eine Temperaturmessung an jeder Stelle im Ofen ermöglichten und wegen ihrer geringen Dicke keine größeren Öffnungen in den Ofenmantel gebohrt werden mußten. Dies ist hinsichtlich der Abdichtung des Ofens und der Vermeidung von Falschlufteinbrüchen in den Brennraum von Bedeutung.

Alle Temperaturen wurden mittels eines 12-Farben-KB-Schreibers fortlaufend registriert. Zusätzlich erfolgte eine halbstündliche Ablesung der Temperaturen, deren Werte für die unmittelbare Feuerführung benutzt wurden.

Für die Messung der Zusammensetzung der Ofenatmosphäre (vgl. Abb. 29) wurde über eine elektrisch beheizte Probenahmesonde die Gasprobe aus dem eigentlichen Brennraum mittels einer Taumelscheibenpumpe abgesaugt. Durch die beheizte Sonde wird ein vorzeitiges Austauen des in dem abgesaugten Meßgasstrom enthaltenen Wasserdampfes vermieden. Die Abkühlung des Meßgases unterhalb des Wasserdampftaupunktes erfolgt in einer wassergekühlten Glasrohrschlange (2). Entsprechend der Meßanordnung konnte bei jeder Probenahme der im Kondensatauffanggefäß (3) aufgefangenen Wassermenge die an der Gasuhr angezeigte "trockene" Restgasmenge zugeordnet werden bzw. daran der Wasserdampfgehalt der Ofenatmosphäre errechnet werden.

Die Gasprobenahme erfolgte in 1/2- bis 1stündigem Wechsel. Eine Gasprobe wurde in einem als "Gasmaus" bekannten Gasprobenahmerohr jeweils für eine Schnellauswertung mit dem Rauchgas-Orsat vor Ort verwendet, während die zeitlich darauffolgende Gasprobe in einer mit Wachs versiegelten Gasmaus einer Gesamtanalyse im Frischgas-Orsat zugeführt wurde. Die Frischgasanalyse mit dem Orsat-Gerät wurden in dankenswerter Weise von Herrn Dipl.-Ing. J. Schorcht vom IBK Weimar durchgeführt.

Die Zug- bzw. Druckmessung erfolgte bei den ersten drei Bränden mittels eines Schrägrohrmanometers über eine Drucksonde im Schürhals und im 4. Brand mittels eines Schrägrohrmanometers über eine Drucksonde im eigentlichen Brennraum des Ofens.

4.5. Ergebnisse

4.5.1. Spezifischer Energieverbrauch und Wärmebilanz des Ofens

Grundlage der nachfolgenden wärmetechnischen Betrachtungen sind die in den Kap. 3.2. und 4.3. vorgegebenen Stoffwerte für das Ofenbaumaterial und den Brennstoff sowie die Ofenabmaße nach Abschnitt 3.2. und die Meßergebnisse der Tabelle 8. Es waren folgende Fragen zu beantworten:

- Wie groß ist der spezifische Wärmeverbrauch für durchschnittliche Brennbedingungen?
- Welche maximale Brenntemperatur wird erreicht?

- Welchen Einfluß hat die massive Bauweise, insbesondere des Unterofens als Wärmespeicher auf den Betrieb des Ofens?
- Welchen Einfluß hat die Höhe des Grundwasserstandes des Erdbodens auf den wärmetechnischen Betrieb des Ofens?
- Welchen Einfluß haben wechselnde Außentemperaturen der Jahreszeiten auf die Betriebsmöglichkeiten des Ofens?

Unbeschadet der Besonderheiten jedes einzelnen Brandes wird der spezifische Wärmeverbrauch aus dem Mittel der Meßwerte der Versuche 1 - 5 gebildet und mit $0,14 \text{ GJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ angegeben. Dieser Wert liegt beim Vierzigfachen des Wärmeverbrauches für den Brand grobkeramischer Erzeugnisse in modernen Industrieöfen des 20. Jahrhunderts. Selbstverständlich beinhaltet er in dieser Form keinen optimierten Wert. Als spezifischer Wert ist er sehr stark von der Dichte der eingesetzten Ware abhängig, und im Sinne der Ökonomie des Brennprozesses wäre die geeignetere Bezugsgröße die aufzubringende Wärmemenge im Verhältnis zu der damit herstellbaren Anzahl verkaufsfähiger Töpfe. Betrachtungen dieser Art haben für historische Aussagen jedoch weniger Wert, da genaue Angaben über gesellschaftliche Aufwendungen für Erzeugnis und Produktionsmittel nicht greifbar sind. Für eine Applikation auf heutige Bedingungen kann auf die Optimierung im 4. Versuchsbrand hingewiesen werden. Entscheidend ist die volle Auslastung des vorhandenen Ofenraumes mit Brenngut und, sofern die anfallende Holzkohle kein gewünschtes Nebenprodukt ist, ihr weitestgehender Abbrand innerhalb der Feuerführung.

Für die Verfahrensgestaltung von wesentlicher Bedeutung ist die Frage nach der Gleichgewichtseinstellung zwischen zugeführter und abgeführter Wärme und die daran gebundene erreichbare Maximaltemperatur des Ofens. Der experimentelle Befund ergab eine mittlere maximale Brenntemperatur von $700^\circ\text{C} \pm 35 \text{ K}$. Wird die archäologisch gesicherte Ofengeometrie als nicht veränderbar vorausgesetzt, verbleibt zur Steigerung des Wärmeaufkommens im Ofen nur die Möglichkeit einer erhöhten Brennstoffzufuhr. Am Ofen selbst wäre dazu eine Veränderung des Ofenzuges durch Vergrößerung oder Vermehrung der Pfeifen in der Lochtenne erforderlich, was zunächst noch im archäologischen Freiraum liegt. Der praktische Ofenbetrieb zeigt, daß nach jedem Nachlegen von Brennholz die Temperatur im Unterofen absinkt. Erhöhter Ofenzug und erhöhte Brennstoffnachfuhr bewirken zunächst nur ein Kaltfahren des Ofens. Temperaturanstieg erfolgt nach dem Auflegen von Brennholz und seiner ersten Entgasung um so kräftiger, je höher das Luftangebot gehalten wird. Da dies durch die Einhaltung der reduzierenden Atmosphäre begrenzt wird, bleibt die Ofentemperatur bereits bei niedrigen Werten "hängen". Da, wie nachgewiesen werden konnte, eine höhere Temperatur zur Erreichung hoher Scherbenfestigkeit auch nicht erforderlich war, muß der vorliegende Ofen als ofenbau- und verfahrenstechnisch optimiert betrachtet werden. Es ist zum abschließenden Verständnis sicher lohnend, in späteren Versuchen genau nachzuweisen, welche Gasatmosphären sich bei Ofenraumtemperaturen oberhalb des bisherigen Arbeitspunktes von $700^\circ\text{C} \pm 35 \text{ K}$ einstellen.

Zur Ermittlung der Wärmebilanz des Ofens wurden die gemessenen Temperaturverläufe mit Fourier-Reihen bis zum 4. Grad geglättet und die Wärmedurchgänge für den instationären Fall der Wiederbeschickung des Ofens nach 12 h errechnet¹⁴. Abb. 30 zeigt als Beispiel die Ergebnisse für Brennversuch 2 mit den weiteren Ansätzen, daß die innere, gegen das Erdreich abgrenzende Fläche des Ofens $3,1 \text{ m}^2$ und die Fläche der Ofenkuppel, die gegen Außenluft abgrenzt, $2,4 \text{ m}^2$ beträgt. Der Abstand des Grundwasserspiegels von der Ofensohle wurde mit $0,5 \text{ m}$ angenommen. Die unter diesen Voraussetzungen ermittelten Wärmeverluste betragen für die Ofensohle $0,72 \text{ GJ}$ pro Brand und für die Ofenkuppel $0,41 \text{ GJ/Brand}$ entsprechend 6 % bzw. 4 % des Gesamtaufwandes.

Der Wärmeverbrauch für die endothermen Reaktionen der keramischen Verfestigung liegt unter 1 % der Gesamtaufwendungen und ist zu vernachlässigen. Der Anteil der Holzkohle an der

Wärmebilanz errechnet sich aus den Werten des Versuches 4 mit 1,0 GJ von 11,3 GJ zu 9 %. Es verbleiben somit 81 % für den Verlustposten des Ofenabgases. Da hierfür keine vollständigen Meßwerte verfügbar sind, wird eine Abschätzung aus den vorhandenen vorgenommen. Die Abgasverluste setzen sich zusammen aus dem Wärmehalt der den Ofen verlassenden Rauchgase sowie den Bildungsenergien seiner unverbrannten Bestandteile. Mit $2,1 \text{ m}^3/\text{kg}$ Gasausbeute bei absteigender Vergasung, einem Heizwert des Holzgases von $6000 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ und einem Holzverbrauch von 713 kg ständen, z. B. dem Versuch 2 mit dem Gas $9,0 \text{ GJ}$ entsprechend, 70 % der eingebrachten Energie zur Verfügung.

Die im Kap. 4.3. vorgelegten Gasanalysen bestätigen, daß der Ofen in weiten Bereichen der Brennkurve als Holzvergaser arbeitet. Die reaktionskinetischen Randbedingungen, wie kurze Verweilzeit der Reaktionspartner Gas und Luft sowie ihre geringe Vermischung im Unterofen führen bei Einhaltung einer reduzierenden Atmosphäre im Brennraum zwangsläufig zum Austrag großer Teile unverbrannter Gase aus dem Ofen. Die Eigenschaft des Buchenholzes, 65 % flüchtige Bestandteile bei Erhitzung abzugeben, prädestinieren es zur sicheren reduzierenden Brandführung, bewirken aber auch den erheblichen Brennstoffverbrauch. Die den Ofen mit der jeweiligen Brennraumtemperatur verlassenden Abgase stellen den zweiten großen Teil der Wärmeverluste dar. Bei Garbrand verlassen sie den Ofen mit $\approx 700^\circ\text{C}$!

Der geringe energetische Wirkungsgrad des Ofens wird also primär durch die hohen Abgasverluste und nicht durch die Wärmeabgabe an die Außenluft und den Erdboden bestimmt. Da ein Unterschied zwischen extremen Sommertemperaturen und Wintertemperaturen nur bei den oberirdischen Bauelementen von Bedeutung ist, kann aus der Außentemperatur allein für den Ofenbetrieb keine Einschränkung hinsichtlich der Auslastung erkannt werden. Für den Wärmedurchgang der Ofensohle bei Grundwasserständen von 0,5 und 1,0 m wurde eine Differenz von 10 % ermittelt. Auch dieser Posten allein kann den Ofenbetrieb nicht wesentlich beeinträchtigen. Sehr wohl denkbar ist jedoch, daß ein Zusammenwirken von sinkenden Außentemperaturen und steigendem Grundwasserspiegel den Ofenbetrieb so beeinträchtigen kann, daß die erforderliche Garbrandtemperatur schwerer erreicht wird. Insgesamt jedoch müssen die jahreszeitlich bedingten Grenzen für die Auslastung einer Töpferei nicht zuerst beim Ofen, sondern in dem Produktionsabschnitt Trocknung gesucht werden. Diese Grenze könnte einen Saisonbetrieb bestimmen.

4.5.2. Temperaturverteilung im Ofen und Gaszusammensetzung der Ofenatmosphäre

Die Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Brenndauer während der einzelnen Brände ist in den Abb. 23, 24, 26, 28, 30 dargestellt und unter Kap. 4.4. eine Beschreibung des zeitlichen Verlaufes der Ofentemperaturen vorgenommen worden. Der Vergleich aller Temperaturkurven zeigt, bis auf die Kühlung, bei allen Bränden ähnliche Verläufe. Die Schürhalstemperatur steigt verhältnismäßig schnell auf ein Niveau von 800°C an und erreicht in der Haltezeit Werte von über 1000°C . In der Hölle steigen die Temperaturen stetiger und langsamer an, um Spitzenwerte zwischen 900 und 1000°C zu erreichen. Im Ofenraum ließ sich bei den vorgegebenen Brennbedingungen eine mittlere, maximale Brenntemperatur von 700°C realisieren. Im Gegensatz zur Aufheizphase und Temperaturhaltezeit gibt es in der Kühlphase der einzelnen Brände große Unterschiede im zeitlichen Temperaturverlauf. Diese Unterschiede sind von der Art der Kühlung abhängig (vgl. Tab. 8), die sich wiederum auf die Gesamtdauer des Brandes und das Brennergebn auswirkt.

Bei allen Bränden ist erkennbar, daß die größten Temperaturschwankungen und die höchsten Temperaturen (bis 1100°C) während der Aufheizphase im Schürhals auftreten, der damit den stärksten thermischen Belastungen ausgesetzt ist. Diese stark ausgeprägten Temperaturschwankungen resultieren aus dem periodischen Auflegen und Abbrennen des Brennholzes.

In der Hölle sind die zeitlichen Temperaturschwankungen schon geringer als im Schürhals und im eigentlichen Brennraum nur noch wenig ausgeprägt. Dabei stellt die Brennraumtemperatur im Gegensatz zu den anderen, die Einzeltemperaturen sind, einen Mittelwert aus sieben bis neun Temperaturmeßstellen dar. In Tabelle 10 sind für den zweiten und dritten Brand die mittleren Brenntemperaturen ϑ_{BR} die minimalen und maximalen Brenntemperaturen ϑ_{BRmin} und ϑ_{BRmax} sowie die Differenz $\Delta\vartheta$ zwischen ϑ_{BRmax} und ϑ_{BRmin} angegeben.

Tab. 10. Mittlere, minimale und maximale Brennraumtemperaturen in Abhängigkeit vom Brennverlauf (2. Brand)

	Mittlere Brenn- raumtemperatur ϑ_{BR} in °C	Minimale Brenn- raumtemperatur ϑ_{BRmin} in °C	Maximale Brenn- raumtemperatur ϑ_{BRmax} in °C	Differenz $\vartheta_{BRmax} - \vartheta_{BRmin}$ in K
Aufheiz- phase	78	70	85	15
	102	90	125	35
	208	195	250	55
	320	290	395	105
	411	370	470	100
	502	470	560	90
	609	580	635	55
Temperatur- haltezeit	709	680	740	60
	706	680	735	55
Kühlphase	637	625	650	25
	530	525	540	15
	426	410	440	30
	359	348	370	22
	301	290	318	28

Tab. 11. Mittlere, minimale und maximale Brennraumtemperatur in Abhängigkeit vom Brennverlauf (4. Brand)

	Mittlere Brenn- raumtemperatur ϑ_{BR} in °C	Minimale Brenn- raumtemperatur ϑ_{BRmin} in °C	Maximale Brenn- raumtemperatur ϑ_{BRmax} in °C	Differenz $\vartheta_{BRmax} - \vartheta_{BRmin}$ in K
Aufheiz- phase	54	50	60	10
	104	85	135	50
	202,5	160	245	85
	318	255	400	145
	416	345	475	130
	501	440	550	110
	610	550	665	115
	653	605	700	95
Temperatur- haltezeit	681	645	720	75
	694	655	745	90
Kühlphase	613	585	650	65
	502	490	530	40
	425	405	455	50
	390	380	420	40

Danach steigen die Temperaturdifferenzen von 10 - 15 K zu Beginn des Aufheizens bis auf ≥ 150 K im mittleren Teil der Aufheizphase an. Vor Erreichen der Maximaltemperatur wird eine Temperaturvergleichmäßigung beobachtet, die sich in der Haltezeit fortsetzt. Mit Be-

ginn der Kühlung wird eine sehr starke Vergleichmäßigung der Brennraumtemperaturen festgestellt. Die durch Zwangskühlung mit Wasser (vgl. Tab. 8, 2. Brand) noch verstärkt wird.

Weiterhin wurde zwischen dem vorderen und hinteren Teil des Brennraumes ein deutliches Temperaturgefälle ermittelt, das in der Aufheizphase und in der Haltezeit z. T. mehr als 100 K betrug.

Die Oberflächentemperaturen der Außenwand des Ofens wurden während des zweiten Brandes gemessen. Bei durchschnittlichen Brennraumtemperaturen von 255 °C und 710 °C wurden die in der Tabelle 12 angegebenen Temperaturen ermittelt:

Tab. 12. Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit von der Brennraumtemperatur (alle Zahlenangaben in °C).

Brennraumtemperatur (Mittelwert)	255	710
Schürhals	60	120 bis 150
Kuppelmitte, vorn	50	110
Kuppelmitte, links	55	110
Kuppelmitte, rechts	50	100
Kuppelmitte, hinten	30	90
Kuppel oben	55	90

In den ausgewiesenen Temperaturunterschieden auf der Außenhaut des Brennofens spiegeln sich im wesentlichen die Temperaturunterschiede im Ofen wider und weisen ebenfalls darauf hin, daß der Schürhals thermisch am höchsten belastet ist.

Zur Deutung der Ergebnisse der Abgasanalysen (Wasserdampf, CO_2 , O_2 , CO , H_2 , CH_4) während der Versuchsbrände im rekonstruierten Töpferofen sollen zunächst einige Bemerkungen zu den Brennbedingungen in einem industriellen Hydritofen - einem periodisch betriebenen Kammerofen - vorangestellt werden. Dieser Ofen ist indirekt beheizt, d. h. die Rauchgase des Heizgases kommen nicht mit dem Brenngut in Berührung. Die sich über dem Brenngut einstellende Gasatmosphäre ergibt sich aus dem Ausspülvorgang der anfangs im Ofenraum noch vorhandenen Luft in Abhängigkeit von den mit steigender Temperatur aus dem Brenngut entweichenden gasförmigen Bestandteilen und der Reaktion der gasförmigen Bestandteile untereinander bzw. mit dem Brenngut (vgl. Müller/Meyer 1982, S. 6 und 7).

In Abb. 15 ist das Verhältnis Wasserdampf/trockenes Restgas über der jeweiligen Prozeßtemperatur im Ofen aufgetragen. Die Kurve besitzt einen für den technischen Hydritbrand typischen Verlauf mit zwei ausgeprägten Maxima. Das erste Maximum entsteht durch das Austreiben der Restfeuchte und des Zwischenschichtwassers aus dem Brenngut und das zweite Maximum des Wasserdampfgehaltes ergibt sich aus der Dehydroxylation der Tonmineralien. In der absoluten Höhe des Wasserdampfgehaltes und der Temperaturlage gibt es eine technologisch bedingte Schwankungsbreite, welche in Abb. 15 schraffiert dargestellt und durch eine Vielzahl von Messungen belegt ist. Abb. 14 zeigt neben dem Wasserdampfgehalt die mit dem Frischgas-Orsat-Apparat ermittelten Hauptbestandteile des Prozeßgases. Dabei wurden die Einzelbestandteile kumulativ aufgetragen und stellen die momentane Zusammensetzung der Ofenatmosphäre zur jeweiligen Prozeßtemperatur dar. Das Zustandekommen dieser Ofenatmosphäre ist von Müller/Meyer (1982, S. 6 und 7) ausführlich erläutert. Soweit die vergleichenden Betrachtungen zum Industrieofen.

Die gemessenen Wasserdampfgehalte und Gasbestandteile der Ofenatmosphäre im Brennraum des Töpferofens sind den Abb. 19, 21 zu entnehmen. Bedingt durch die direkte Beheizung des rekonstruierten Töpferofens stellt sich im Brennraum dieses Ofens eine Mischatmosphäre aus den Rauchgasbestandteilen der Holzverbrennung und den Entgasungsprodukten des Brenngutes

ein. Damit ist auch der gegenüber dem industriellen Hydritofen niedrigere Wasserdampfanteil in der Ofenatmosphäre erklärbar. Im Vergleich zu oxydierend betriebenen Tunnelöfen, in denen für Ziegelerzeugnisse aus illitischen Keupertonen, die auch für die Herstellung der vorliegenden Töpfererzeugnisse dienen, Brenntemperaturen von ca. 950 °C realisiert werden müssen, ist der durchschnittliche Wasserdampfanteil jedoch wesentlich höher. Während im Tunnelofen nach Schneider/Steinhardt/Walter (1982, S. 117) Wasserdampfgehalte um 6 Vol-% auftreten, liegen diese im Töpferofen im Mittel höher als 20 Vol-% und erreichen zum Ende der Haltezeit und Beginn der Kühlung Maximalwerte von mehr als 60 Vol-%.

Trotz unterschiedlicher Beheizung des Töpferofens gegenüber dem industriellen Hydritofen läßt sich ein ähnlicher Verlauf des Wasserdampfgehaltes in der Atmosphäre des Ofens mit zwei ausgeprägten Maxima feststellen.

Wichtige Gasbestandteile, welche die Ofenatmosphäre charakterisieren, sind O_2 , CO und H_2 . Diese sind neben anderen Gasbestandteilen wie CO_2 , H_2O und CH_4 in den Abb. 19 und 21 für den 2. und 3. Brand dargestellt. Bei Addition dieser Werte besteht der sich zu 100 Vol-% ergebende Rest im wesentlichen aus Stickstoff (N_2). Zur Charakterisierung der Ofenatmosphäre wird auf die von Günther (1974, S. 20) vorgelegte Systematik zurückgegriffen (vgl. Tab. 13).

Tab. 13. Feuereinstellungen

Bezeichnung	Abgas enthält außer CO_2 , H_2O und N_2 nur
Oxydierend	O_2
Halboxydierend	O_2 , CO und H_2 , wobei $ CO + H_2 < 2 O_2 $
Neutral	nichts oder O_2 , CO und H_2 , wobei $ CO + H_2 = 2 O_2 $
Halbreduzierend	CO, H_2 und O_2 , wobei $ CO + H_2 > 2 O_2 $
Reduzierend	CO, H_2

Diese Einteilung gilt streng genommen nur für die Feuerungseinstellung, wobei innerhalb der Flamme selbst alle Varianten vorkommen können, ist aber auch zur Charakterisierung der Ofenatmosphäre geeignet.

Durch Strahlenbildung innerhalb der Rauchgase kommt es auch in dem Töpferofen zu örtlich und zeitlich unterschiedlichen Konzentrationen an Abgasbestandteilen, so daß Luftsauerstoff und brennbare Substanzen nebeneinander auftreten können. Insgesamt kann man jedoch die Ofenatmosphäre als halbreduzierend mit einer Tendenz zu reduzierend charakterisieren. Der reduzierende Grundcharakter der im Töpferofen realisierten Ofenatmosphäre läßt sich weiterhin anhand der Brennfarbe der während des dritten und fünften Brandes in der Phase des Aufheizens und der Haltezeit gezogenen Brennproben nachweisen. An Stahlstäben befestigte Prüfkörper aus Ton wurden in bestimmten Abständen durch die Rauchgasabzugsöffnung aus dem Brennraum geholt. Dabei waren diese Proben ausnahmslos grau gefärbt. Die bei den Bränden 1 - 4 am Ende des Brandes überwiegend beobachtete lederfarbene Oxydationshaut ist also ein Ergebnis von Falschlufteinbrüchen während der Kühlphase. Beim Zustandekommen von Falschlufteinbrüchen durch undichte Stellen (Risse o. ä.) in der Ofenwandung bzw. den zu Beginn der Kühlung verschlossenen Schürhals- bzw. Rauchgasabzugsöffnungen ist die Schornsteinwirkung des noch heißen Ofens zu berücksichtigen. Der fünfte Brand liefert mit der vorwiegend grauen Brennfarbe der Erzeugnisse dafür ebenfalls einen Beweis, da eine Reoxydation durch Falschlufteinbrüche während der Kühlung durch sorgfältige Abdeckung des gesamten Ofens mit Rasensoden verhindert wurde.

In der Systematik von Günther (1974) wird die Rolle des Wasserdampfes auf das Brennergebnis nicht berücksichtigt. Eine fördernde bzw. beschleunigende Wirkung des Wasserdampfes bei Feststoffreaktionen unter hohen Temperaturen ist jedoch bei Tonen festgestellt worden.

Aus den gemessenen Brennparametern Temperatur, Haltezeit, Wasserdampfgehalt, Gehalt der Ofenatmosphäre an sonstigen Gasbestandteilen - läßt sich in Anlehnung an den industriellen Hydratbrand ableiten, daß für die im rekonstruierten Töpferofen gebrannten Erzeugnisse der Wasserdampf von entscheidender Bedeutung war. Dabei zeigten die verschiedenen Kühlmethoden, daß auch ohne zusätzliches Wassereindüsen ein entsprechend hoher Wasserdampfpartialdruck im Brennraum aufgebaut wird. Dieser Wasserdampf kann entstammen:

- der Entwässerung der Tonminerale des Brenngutes,
- der Entwässerung der Tonminerale des zum Bau bzw. für die Reparatur des Ofens benutzten Tones,
- der Benetzungs- und Sorptionsfeuchte aus dem Untergrund, insbesondere den Abdichtungsmaterialien für die Kühlung und
- den Verbrennungsprodukten des Brennmaterials während der Beheizung des Ofens.

Die Forderung bzw. die Zielstellung zum Brennen grauer Keramik muß sich für den frühgeschichtlichen Töpfer erfahrungsgemäß aus der Qualität der Erzeugnisse ergeben haben. Graue Keramik erfordert jedoch reduzierende Ofenatmosphäre während des Aufheizens und der Haltezeit sowie Sauerstoffausschluß in der Kühlphase. Unter diesen Gesichtspunkten und der Kenntnis der fördernden Wirkung des Wasserdampfes auf die Verfestigung von Tonen sowie die durch Messungen ermittelten Gaszusammensetzungen der Atmosphäre im Töpferofen muß der Anfangsphase der Kühlung für das "Garbrennen" des Scherbens eine entscheidende Bedeutung zukommen. Zu Beginn der Kühlung herrschen noch relativ hohe Temperaturen und es bauen sich Wasserdampfgehalte von 60 Vol-% auf. Das bedeutet jedoch auch, daß mit Beginn der Kühlung, wenn der Ofen geschlossen wird, die Entwässerung der Tonminerale noch nicht beendet sein darf, damit noch ausreichend Wasserdampf in der Ofenatmosphäre entstehen und kein Sauerstoff in den Ofen eindringen kann.

Zusammenfassend läßt sich aus den Ergebnissen der meßtechnischen Überwachung feststellen: Nach den uns vorliegenden Erkenntnissen wurde erstmals für Versuchsbrände in einem rekonstruierten Töpferofen eine solche umfassende meßtechnische Überwachung durchgeführt. Als Ergebnis dieser Messungen konnte ebenfalls erstmalig der Einfluß einer wasserdampfhaltigen Ofenatmosphäre mit reduzierendem Grundcharakter auf das Brennen grauer Töpferware nachgewiesen werden, wobei die umfangreichen Ergebnisse aus industriellen Hydratöfen zur Deutung herangezogen wurden. Bei maximalen Brenntemperaturen von $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$ gelang es, in dem rekonstruierten Töpferofen Erzeugnisse mit solchen Eigenschaften zu brennen, für die in oxydierender Ofenatmosphäre und bei geringen Wasserdampfgehalten Brenntemperaturen von $900 - 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ erforderlich gewesen wären. Ferner gelang es nachzuweisen, daß das Brenngut bis zu Beginn der Kühlphase grau ist und erst während der Kühlung durch Falschlufteinbrüche in den Brennraum eine Reoxydation eintritt. Damit steht ebenfalls fest, daß die Betreiber dieses Ofens beim Herstellen grauer Keramik der Kühlung besonderes Augenmerk schenken mußten.

5. AUSWERTUNG

5.1. Bewertung der Töpferware

Zur Einschätzung der erreichten Qualität des Scherbens wurden die erreichten Festigkeiten von Probekörpern der Abmaße $15 \times 25 \times 110\text{ mm}$ aus dem Brand im rekonstruierten Ofen Haushausen, im industriellen Hydratofen Niedertopfstedt und im Tunnelofen Bischleben verglichen. Die Probekörper wurden unter gleichen Bedingungen aus Niedertopfstedter Ton hergestellt und erlauben somit den Vergleich des Brennergebnisses verschiedener Öfen und den Qualitätsbezug zu industriell hergestellten keramischen Erzeugnissen. Da der Großteil der im Töpferofen gebrannten Töpferware ebenfalls aus Niedertopfstedter Ton hergestellt wurde, ist durch diese Methode weiterhin die vergleichende Aussage zu allen ermittelten keramischen Eigenschaften der Niedertopfstedter Produktion möglich. Es wird der zum Durchbrechen

der Probekörper benötigte Druck (10 Probekörper je Wert) als Vergleichswert angegeben. Die Auswertung des 5. Brandes ergibt beispielsweise nach dieser Methode:

Ofentyp	Brenntemperatur	Festigkeit
Töpferofen Haarhausen	720 °C	14 MPa
Hydritofen Niedertopfstedt	770 °C	14 MPa
Tunnelofen Bischleben	980 °C	15 MPa

Im Ziegelwerk Niedertopfstedt werden großformatige Leicht- und Deckenziegel hoher Festigkeit produziert.^x

Als Grundaussage ergibt sich, daß der Töpferofen bei 700 °C ± 35 K im Vergleich zum industriellen Hydritofen bei niedriger Temperatur aber längerer Brennzeit Töpferware gleichwertiger keramischer Gebrauchswerteigenschaften produziert. Im Vergleich zum oxydierenden Brand im Tunnelofen, dem heute üblichen Industrieofen, erzielt man gleiche Qualität bei 250 K niedrigerer Temperatur. Zu beachten ist, daß die Industrieöfen auf die Produktion ihres jeweiligen Erzeugnisses eingestellt sind und Aussagen über die mit dem Brennverfahren maximal erreichbaren Festigkeiten nicht gestatten.

Differenziert für den Haarhäuser Ofen ergab sich:

Lage der Proben im Ofen	Brenntemperatur	Festigkeit	Brennschwindung
rechte Ofenseite, frei gelagert	730 °C	14,0 MPa	1,0 %
rechte Ofenseite, verschlossen gelagert	710 °C	13,8 MPa	1,1 %
linke Ofenseite, frei gelagert	660 °C	13,0 MPa	0,5 %

Die frei gelagerten, d. h. dem Ofengas direkt ausgesetzten Probekörper hatten bei grauem Kern eine etwa 1 mm starke gelb-braune Oxydationsschicht, während die in einem Tongefäß verschlossenen Probekörper durchgängig grau waren. Ihre gleiche Verfestigung ist offensichtlich auf die ausgleichende Wirkung der Haltezeit bei Garbrandtemperatur zurückzuführen. Bemerkenswert ist auch der Befund des 3. Versuchsbrandes, daß die Festigkeiten der Proben, die zusammen mit Holzkohle in ein Gefäß eingeschlossen wurden, um 25 % deutlich niedriger lagen. Die Deutung geht dahin, daß die Wassergasreaktion den Wasserdampf verbraucht und durch ihren endothermen Charakter die Brenntemperatur senkt. Kohlehaltige Scherben sind also im lichten Besatz abzubrennen, wenn sie bei niedrigen Temperaturen hinreichende Festigkeiten bringen sollen.

Aus den Befunden der Probekörper, besonders des 5. Brandes, kann nun auch auf die Festigkeit der in der gleichen Ofenatmosphäre gebrannten Keramik geschlossen werden.

Wie aus Tab. 8 ersichtlich und bei der Beschreibung der einzelnen Brände detaillierter aufgeführt, blieb die Brennfarbe der Gefäße nicht immer grau. Durch die Einwirkung von Sauerstoff in der Kühlphase nahm sie in einem Reoxydationsprozeß lederfarbene Töne an. Die ursprüngliche Graufärbung und damit die reduzierende Brenn-atmosphäre während des Garbrandes ist beweisbar an einigen gekapselt oder gebördelt eingesetzten Gefäßen.

Brand 2: Krug 51 unter Topf 56, Krug hat grauen Kern zwischen zwei reoxydierten Schichten; Krug 61, abgeschlossen mit Pfropfen, Kern ist grau, äußere Reoxydationsschicht ist stärker als die im Gefäßinneren. Reibschalen 68 und 69 waren ineinander gesetzt, bei der unteren blieb der Boden von innen, bei der zweiten der Boden von außen grau.

Brand 3: In Topf 61 befanden sich die Schalen 65 und 66 ineinandergesetzt, abgedeckt durch die Reibschale 107. Während der der Brenn-atmosphäre direkt ausgesetzte Topf reoxydiert ist,

^x) Im Vergleich dazu haben auch die im Töpferofen bei Versuchsbrand Nr. 1 mitgebrannten Wenko-Deckenziegel die Qualitätsprüfung nach IGL 117-0139 bestanden.

sind die abgedeckten Flächen der beiden ineinandergesetzten Schalen grau geblieben, z. T. auch die Abdeckschale. Die den Topf 92 abdeckenden, gebördelt aufgesetzten Reibschalen 108 und 109 schlossen offenbar nicht ganz dicht ab, so daß die graue Farbe ausgeprägt am Boden, als Reste aber auch an der Innenwandung beider Schalen erhalten blieb.

Brand 4: Schalen 84 und 85 waren mit der Mündung nach unten übereinander gestülpt. Bei der unteren blieb das abgedeckte Unterteil, bei der oberen die Innenfläche dunkler als die sonst reoxydierten Flächen.

Schalen 90 und 66 übereinander umgestülpt eingesetzt. Das Unterteil der unteren Schale und die gesamte Innenfläche der oberen Schale blieben intensiv grau.

Die angeführten Beispiele belegen eindeutig reduzierende Brenn-atmosphäre bei den Brennversuchen. Diese Ergebnisse korrespondieren ebenfalls mit den im Kap. 4.5.2. beschriebenen Nachweisversuchen (Ziehen von Probekörpern während des Brandes) für reduzierende Feuerführung.

5.2. Bewertung des Brennverfahrens

Durch die fünf Versuchsbrände wurde nachgewiesen, daß bei einer eindeutig reduzierenden Brennweise mit dem vorliegenden Ofen Brenntemperaturen bis 730 °C möglich sind. Unter der Annahme, daß dieser Ofentyp optimal gestaltet und optimal befeuert wird, sind, bezogen auf die gesamte Varianz geschichtlicher Anwendung für reduzierende Brände, maximale Brenntemperaturen von 800 °C denkbar.

Vergleichbar sind die hier im freistehenden Kuppelofen von 0,7 m³ Kapazität durchgeführten Brennversuche bei reduzierender Atmosphäre nur mit denen von Winter (1978, S. 36) und Bryant (1978/79, S. 15). Besonders durch die Versuche von Bryant im "permanent domed kiln" nach Untersuchungen in Barton-on-Humber wurde die 800 °C-Grenze erkennbar, denn bei geringem Brennmaterialverbrauch (25 kg Holz) konnte diese Temperatur leicht erreicht werden, während ein Anstieg um weitere 200 K nur schwer und bei unökonomischem Brennstoffverbrauch (nochmals 75 kg) erreicht wurde. Ofenform, Proportionen und Zugverhältnisse determinierten für den genannten Ofentyp diese Temperatur als Grenzwert bei reduzierender Brenn-atmosphäre. Ungeklärt bleibt jedoch der geringe Holzverbrauch bei den Versuchen Bryants, wenngleich Masse des Einsatzgutes und Dauer des Brennvorganges nicht bekannt sind. Denn auch bei den reduzierenden Brennversuchen im Kuppelofen von Winter (1978, S. 39) lag der Brennmaterialverbrauch um ein Drittel höher als bei den oxydierend gefahrenen Schachtföfen mit provisorischer Abdeckung.

Die vorgelegten Versuchsergebnisse im rekonstruierten Haarrhäuser Ofen zeigen, daß graue Keramik nur im dichten Ofen zu brennen ist. Mit den Versuchen zur schnellen Kühlung wurde der Nachweis erbracht, daß die Kühlgeschwindigkeit keinen Einfluß auf die Scherbenfestigkeit hat. Demzufolge ist die Kühlung in reduzierender Atmosphäre, als Voraussetzung grau bleibender Scherben, primär nicht dem Kühlvorgang selbst geschuldet, sondern muß sich als natürliche Folge der zum Garbrand notwendigen Bedingungen ergeben. Bezüglich der Abhängigkeiten zwischen Brennverfahren und Rohstoffeignung wurde in Abschnitt 2 dieser Arbeit gezeigt, daß für den vorliegenden Rohstofftyp der Hydritbrand bis 750 °C einwandfreie Gebrauchseigenschaften des keramischen Scherbens liefert. Um dieses Verfahrensprinzip des Brennens in den eigenen Entgasungsprodukten trotz direkter Beheizung stark zur Wirkung zu bringen, wurde der Garbrand ohne Brennstoffzufuhr (dieser Zeitpunkt wird gemeinhin als Beginn der Kühlung betrachtet), d. h. unter Wärmezuführung aus der Speicherwärme des Unterofens im Temperaturbereich der Dehydroxylation der Tonminerale durchgeführt. Damit war der gesamte Brand aber zwangsläufig auf niedrige Garbrandtemperaturen fixiert, eben dem Temperaturbereich von 650 °C - 750 °C, den dieser Ofentyp in reduzierender Atmosphäre eindeutig reproduzierbar gestalten konnte.

Aufmerksamkeit muß aber auch der Frage gewidmet werden, welche Gründe die provinzialrömischen Töpfer der ersten Jahrhunderte u. Z. veranlaßten, ihre Produkte in unterschiedlicher Farbe, unterschiedlichen Ofentypen und unterschiedlicher Brennatmosphäre zu brennen. Zum Brand der hochglänzenden Terra Sigillata benutzte man Schachttöfen mit provisorischer Abdeckung. Bei kürzerer Brennzeit und geringerem Holzverbrauch erzielte man unter oxydierenden Brennbedingungen wesentlich höhere Garbrandtemperaturen. Dagegen wurde graue oder schwarze Keramik in Kuppelöfen gebrannt, deren Nachteile schon Winter (1978, S. 40) in längerer Brennzeit und größerem Verbrauch von Brennmaterial sah. Als einen weiteren Nachteil nannte Bryant (1978/79, S. 15) die längere Bauzeit des Kuppelofens im Vergleich zum Schachtofen.

Die zahlreichen Brennversuche von Winter (1978, S. 36) und Bryant (1978/79, S. 13 ff.) haben diese sortimentspezifische Zuordnung der Ofentypen bestätigt. Schwieriger lassen sich dafür die Gründe ermitteln. Sie sind nicht nur im Ofentyp begründet, denn im Kuppelofen, wie der in Haarhausen vorliegende, kann auch eine oxydierende Brennatmosphäre eingestellt werden, wie man andererseits im Schachtofen bei gründlicher Abdeckung reduzierende Ware erhalten kann (Bryant 1978/79, S. 20).

Hier schälen sich zwei Fragen heraus, die in weiteren Untersuchungen abzuklären sind. Konnte mit dem Kuppelofen, Typ Haarhausen, auch reproduzierbar oxydierend gebrannt werden und warum hat sich die Produktion grauer Keramik so lange gehalten. Zu der über geschichtlich lange Zeiträume stabilen Produktion grauer Keramik haben auf ihre Weise sicherlich auch die Besonderheiten des Hydratbrandes beigetragen. Insbesondere der schonende Brand und die hohen Scherbenfestigkeiten sowie die Erfahrungen, daß Luft dem Brennergebnis abträglich ist und daß ein gutes Brennergebnis bei niedrigen Temperaturen erreichbar ist.

Für eine Klärung, ob im vorliegenden Ofentyp auch oxydierend gebrannt werden konnte, sind weitere Versuche erforderlich.

5.3. Bewertung des Brennofens

Wie bei jedem aus Lehm gebauten Töpfer- oder Ziegelofen traten auch bei dem rekonstruierten Ofen von Haarhausen an der Wandung der Ofenkuppel, am Übergang vom Schürhals zur Kuppel und an der Einsetzöffnung Risse in Folge der Schwindung auf. Sie wurden jeweils mit gemagertem Lehm verschmiert, gefährdeten aber zu keiner Zeit die Statik des Ofens. Da dadurch auch Falschluf gezogen wurde, gelang die Abdichtung des Ofens erst durch Auftragen einer Kalk-Mörtelschicht und Auflegen von Rasensoden.

Nachbehandlung war während der Brände auch bei der Einsetzöffnung notwendig. Da die hier über den Wölbtopfen der Einsetzöffnung aufgetragene Verschmiermasse reichlich mit Benetzungsfeuchte versehen war, vollzog sich deren Trocknung und Schwindung erst parallel mit dem Brennvorgang. Das bewirkte teilweise ein plattenförmiges Loslösen der Masse von den Wölbtopfen und deren Neuverschmierung.

Schwerwiegender waren Risse an einem linken Viertel der Lochtenne, hier mußte sie versteift werden. Die Ursachen für diese Beschädigung sind einerseits in dem segmentartigen Aufbau der Tenne zu suchen, andererseits aber war im Verlaufe unseres Versuchsprogramms beim 2. und 3. Brand Wasserkühlung getestet worden. Dabei wurde in den örtlich zwischen 900 - 1000 °C erhitzten Ofenraum am Übergang Schürhals/Kuppel eine große Menge Wasser eingedüst, sie traf vorwiegend auf die Lochtenne und den Steg.

Ohne diese durch das Versuchsprogramm bedingte extreme Beanspruchung der Tenne (mechanisch und thermisch) hält dieser Ofentyp zahlreiche Brände aus.

Der in Haarhausen nachgebaute Ofen mit eingetieftem Feuerungs- und kuppelförmigem, freistehendem Brennraum sowie mit längerem, die Zugverhältnisse garantierenden Schürhals hat sich als konstruktive Einheit voll bestätigen können.

Als sehr stabil erwies sich der Feuerungsraum (Unterofen). Trotz der hier herrschenden größten Hitze, d. h. also maximaler thermischer Belastung, sind keine Beschädigungen aufgetreten bzw. zu erwarten. Seine Konstruktion ist den hier vorkommenden Temperaturen ganz angepaßt.

Einen kritischen Punkt könnte die Lochtenne darstellen, die außer extremen Temperaturen (an der vorderen, unteren Seite bis zu 1000 °C) auch maximaler mechanischer Belastung ausgesetzt ist, denn sie trägt die gesamte Masse des Einsatzgutes. Es müßte in weiteren Versuchen abgeklärt werden, wie weit veränderte Konstruktion (Fertigung in einem Stück über einem Gerüst, größere Stärke) und ausschließliche natürliche Kühlung eine Optimierung der Leistungsfähigkeit der Lochtenne bedeuten könnten.

Als optimale Lösung erwies sich der Bau der Brennraumkuppel (Oberofen) aus Wölbtopfen. Die schon im Kap. 3.1. angedeuteten Vorteile ihrer Benutzung haben sich voll bestätigt.

Die Wölbtopfe stellen ein sehr einfach zu handhabendes Baumaterial dar, das auch einen an Masse sehr leichten Oberbau des Ofens bedingte, also statische Vorteile brachte. Die Kuppelform des Brennraumes kommt dem Einsatz der Wölbtopfe stark entgegen.

Die große Stabilität der Brennraumwandung, die trotz der auftretenden Risse konstatiert werden kann, geht auf die ein festes "Gerüst" bildenden Wölbtopfe zurück.

Optimal ist die wärmedämmende Funktion dieser Hohlkörper. Messungen mit dem Anlegepyrometer bei unseren Brennversuchen ergaben, daß bei Temperaturen der Hölle zwischen 900 - 1000 °C an der Außenwandung nur 100 - 110 °C festgestellt werden konnten, die Wärmeübertragung durch die Wandung an die Außentemperatur ist folglich minimal. Andererseits war auch die lange Kühlzeit bei der natürlichen Kühlung nach dem 1. Brand im wesentlichen durch die Wärmeisolierung der Wölbtopfe bedingt.

Wie schon von Winter (1978, S. 41) festgestellt, ließ sich auch in Haarhausen als weiterer Vorteil dieser Wölbtopfe die Möglichkeit ihrer sekundären Verwendbarkeit erkennen. Das ist überzeugend beweisbar an den bei allen Bränden wiederverwendeten Wölbtopfen zum Zusetzen der Einsetzöffnung. Diese Topfe weisen nach der Entfernung der Lehm-Verschmiermasse keine Beschädigungen auf.

Die Summe der positiven Merkmale der Wölbtopfe für Aufbau, Konstruktion und Wärmetechnik führen zu der Schlußfolgerung, daß derartig konstruierte Töpferöfen bei ernststen Beschädigungen des empfindlichsten Elements, der Lochtenne, relativ arbeits- und zeitsparend ausgebaut werden konnten, indem man das Oberteil abbaute, eine neue Tenne einzog und mit den gleichen Wölbtopfen den Ofen wieder errichtete.

5.4. Rekonstruktion von Produktionsumfang und -organisation

Aus den experimentell ermittelten Werten der Versuche 1 bis 5 können bei Berücksichtigung der jeweiligen Besonderheiten der einzelnen Brände die folgenden Basiswerte eines Brandes des Ofens als Mittelwerte einer längeren Produktionszeit herausgezogen werden:

Brennzeit:	2 - 3 Tage
Brenngut:	< 150 kg $\hat{=}$ 150 Gefäße
Holzverbrauch:	700 - 1000 kg
Nebenproduktion:	20 - 50 kg Holzkohle

Das jährliche Zeitvolumen von 360 Tagen muß für die Produktion um mindestens 100 - 120 Frosttage vermindert werden, da die dem Brand vorgelagerte Produktionsstufe Trocknung einschließlich Transport diesen Temperaturbedingungen nicht angepaßt waren.

Eine Regenbelastung von mehreren Stunden konnte, wie Versuch 5 zeigte, durchaus ohne Schaden durchgestanden werden. Die Verfügbarkeit des Ofens ergibt sich beim Ansatz von einem Reparaturtag zwischen 2 Bränden und 5 Tagen für die Neuzustellung zwischen je 10 Bränden ca. 60 %. Bei dieser Auslastung ergeben sich ca. 60 Brände im Jahr mit einem Produktionsausstoß von 7500 - 9000 kg entsprechend 7500 - 9000 Gefäßen für diesen Zeitraum.

Ein derartiger jährlicher Produktionsausstoß läßt die Schlußfolgerung zu, daß die Keramikherstellung solchen Umfangs arbeitsteilig organisiert war, von Handwerkern betrieben wurde (Dusek 1984, S. 5 ff.). Für die Herstellung von 7500 - 9000 Gefäßen muß mit arbeitsteiliger Struktur aller vor- und nachgelagerten Produktionsstufen gerechnet werden, es betrifft die Sicherung der Materialversorgung für das Brenngut und für das Brennmaterial, d. h. Abbau, Transport und Aufbereitung von über 8 - 9 t Ton und 75 - 90 Rm (40 - 60 t) Holz. Die Formung von 7500 - 9000 Gefäßen erforderte mindestens 150 - 180 Töpfer-Tagwerke. Einen weiteren Bereich stellten Ofenbau und -erhaltung sowie die eigentlichen Brände dar.

Ein solcher Produktionsausstoß stellte auch bestimmte Bedingungen an die Distribution der Produkte.

Die Ergebnisse der Rekonstruktionsbrände - besonders hinsichtlich der Produktivität dieses Ofens - bilden einen methodischen Eckpfeiler für die Feststellung, daß hier im ausgehenden 3. Jh. Ware produziert wurde.

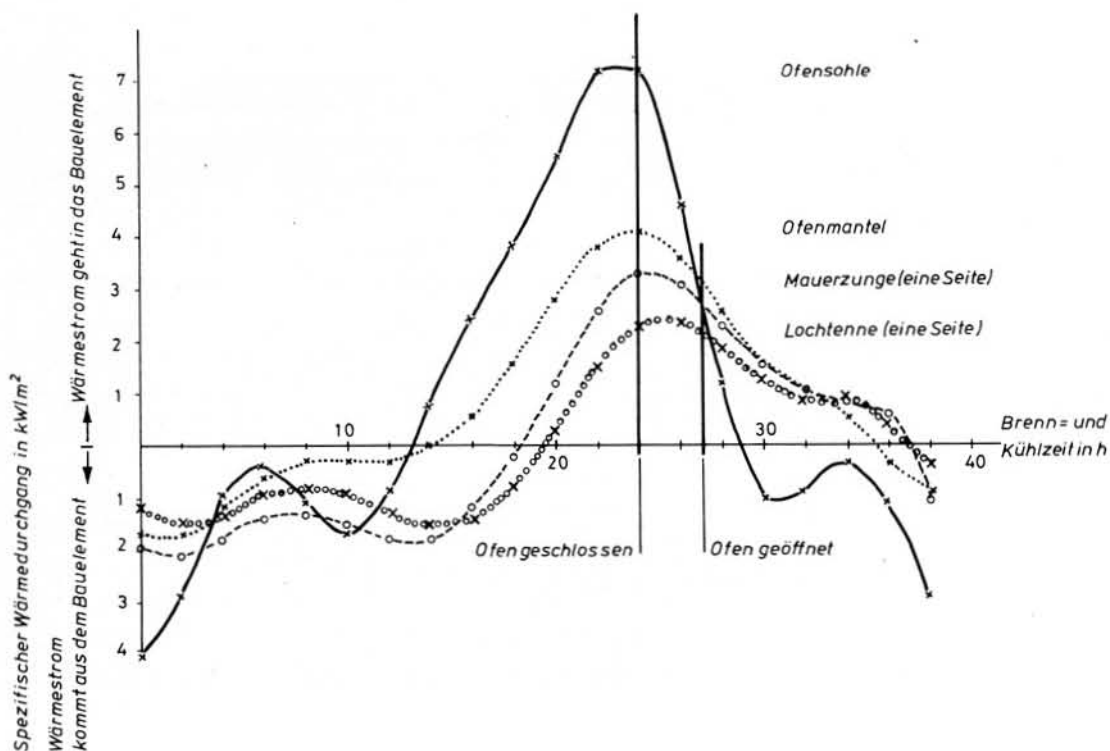


Abb. 30. Spezifischer Wärmedurchgang verschiedener Ofenbauteile (am Beispiel von Brand 2).

6. ZUSAMMENFASSUNG

1. Seit 1979 wird in Haarhausen, Kr. Arnstadt, erstmalig im Raum Thüringen eine römisch-germanische Töpferei aus der Zeit um 300 u. Z. freigelegt, bei der auch Töpferöfen für das Brennen von Drehscheibenkeramik untersucht wurden. Der Erhaltungszustand der Öfen und die Belege einiger Details des Ofenbaus lieferten ausreichende Grundlagen für die originalgetreue und funktionstüchtige Rekonstruktion eines Töpferofens.
2. Der Nachbau eines Ofens und die Versuchsbrände erfolgten in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Archäologen und Verfahrenstechnikern. Die in Haarhausen gefundene vorwiegend graue Drehscheibenkeramik signalisiert reduzierende Brennatmosfera. Es wurde als Prämisse angesehen, daß die von den Ofenproportionen abhängigen niedrigen Garbrandtemperaturen $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$ nur unter Wirkung des Wasserdampfpartialdruckes in der Ofenatmosfera zur irreversiblen Verfestigung des keramischen Scherbens führen.
3. Der archäologischen Vorlage in Material und Dimensionen getreu wurde ein funktionstüchtiger Ofen nachgebaut. Als Baumaterial kamen 6,6 t mit Häcksel gemagerter, aus örtlichen Aufschlüssen stammender Ton sowie aus gleichem Material hergestellte 210 Wölbtopfe und 375 Formsteine zum Einsatz.
4. Für jeden der in diesem Ofen durchgeführten fünf Brände werden der genaue Verlauf mit allen Meßwerten zu Material, Mengen und Zeit und sonstige Beobachtungen dokumentiert. Als Besatzprinzip galt maximale Ausnutzung des Brennraumes durch lockere Anordnung der Gefäße.

Die Feuerung läßt sich in mehrere Phasen gliedern. Für die Feuerungstechnik waren Ofenproportionen und reduzierender Brand determinierende Faktoren. Bei einer durchschnittlichen Garbrandtemperatur von $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$ gelang über Ermittlung des spezifischen Wärmeverbrauchs und der Wärmebilanz des Ofens die Feststellung, daß Außentemperaturen und Höhe des Grundwassers keine zeitlichen Begrenzungsfaktoren für den Ofenbetrieb darstellen.

Im Ergebnis der Versuchsbrände kann als sicher angesehen werden, daß die zum Brennen grauer Keramik notwendige reduzierende Ofenatmosfera beim Aufheizen und Garbrennen relativ einfach einzuhalten ist. Demgegenüber erfordert die Kühlung besondere Sorgfalt, um den für die Verfestigung notwendigen Wasserdampfpartialdruck aufzubauen und Falschlufteinbrüche sicher zu vermeiden.
5. Analysen der Biegezugfestigkeit mitgebrannter Probekörper ergaben Werte, die hinsichtlich der Verfestigung mit den Produkten des großtechnischen Hydritofens im Ziegelwerk Niedertopfstedt identisch sind. Die vorherrschende reduzierende Brennatmosfera während aller Versuchsbrände belegen Graufärbung von gekapselt oder gebördelt angeordneten Gefäßen.

Die hohe Verfestigung der Gefäße ist bei den niedrigen Brenntemperaturen ($700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$) nur unter reduzierend-hydrothermalen Brennbedingungen möglich. Der Temperaturgrenzwert dieses Ofentyps für reduzierende Brennbedingungen liegt bei $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Ofen ist trotz notwendiger Ausbesserungen des Ofenmantels und der Lochtenne für zahlreiche Brände zu verwenden.

Bei einer Ofenfüllung von maximal 150 Gefäßen und der Dauer eines Brennprozesses von 2 - 3 Tagen kann mit einer jährlichen Produktion von 7500 - 9000 Gefäßen gerechnet werden. Solche Produktivität setzt Warenproduktion - getragen von Handwerkern - voraus, die die Bedürfnisse eines großen Abnehmerkreises befriedigen konnte.
6. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Archäologen und Verfahrenstechnikern hat die gestellten Ziele methodisch und sachlich voll erfüllt: die Herstellung grauer Keramik. Erstmals gelang dazu die ausführliche meßtechnische Überwachung von Ofenatmosfera und Brenntemperatur und die durch Erfahrungswerte abgesicherte Rekonstruktion des Produktionsprozesses einer nach römischer Technologie und Betriebsstruktur arbeitenden Drehscheibentöpferei des 3. Jh. u. Z. in Thüringen.

Résumé

1. Depuis 1979 on est en train de déblayer pour la première fois dans la région de Thuringe à Haarhausen, arrondissement Arnstadt, un atelier de potier romain germanique de la période de 300 de notre ère en faisant des recherches concernant les poêles de potier pour la cuisson des céramiques du tour de potier. Les restes des poêles en bon état et quelques détails concernant la construction des poêles livraient les bases suffisantes pour la reconstruction fidèle et fonctionnante d'un poêle de potier.
2. L'imitation d'un poêle et les cuites d'essai étaient procédées dans la collaboration interdisciplinaire entre archéologues et spécialistes de la technique de procédée. Les céramiques du tour de potier en majorité grises trouvées en Haarhausen signalisent une atmosphère de cuisson réductrice. Il était considéré comme une prémisse que les températures basses de la cuite bien ($700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$) dépendant des proportions du poêle mènent au durcissement irréversible de la céramique seulement sous l'influence de la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère du poêle.
3. Fidèle en matériel et dimensions du modèle archéologique un poêle fonctionnant était construit. Pour le matériel de construction on a utilisé 6,6 t d'argile provenant des ouvertures locales et maigri avec paille hachée, ainsi que 210 pots voûtés et 375 pierres formées, qui sont manufacturés du même matériel.
4. Le déroulement et les autres observations sont documentés exactement pour toutes les cinq cuites procédées dans ce poêle avec toutes les données mesurées concernant le matériel, la quantité et le temps. Le principe d'armement du poêle avec les pots était l'utilisation maximale du chambre de cuisson par une disposition peu serrée des vases.

Le chauffage, on peut le diviser en plusieurs phases. Les proportions du poêle et la cuite réductrice étaient des facteurs déterminants pour la technique du chauffage.

Sous une température moyenne de la cuite bien de $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$ on a été en mesure de constater par la recherche de la consommation spécifique de la chaleur et du bilan de chaleur du poêle que les températures extérieures et la hauteur de l'eau souterraine ne sont pas des facteurs limitants pour l'utilisation du poêle.

En résultat des cuites d'essai on peut constater sûrement que l'atmosphère réductrice du poêle, nécessaire pour la cuisson des céramiques grises, est à arrêter relativement simple pendant le chauffage et la cuite bien. Par ailleurs, le rafraîchissement exige un soin particulier afin d'élever la pression partielle de la vapeur d'eau qui est nécessaire par le durcissement et d'éviter sûrement l'entrée de l'air faux.

5. Les analyses de la résistance à la traction et à la flexion des corps d'essai cuits en même temps ont donné des valeurs qui sont identiques concernant le durcissement avec les produits du Hydrit-poêle grand-technique dans la tuilerie Niedertopfstedt. La coloration grise des vases disposés "protectionnés" et "bordés" montent une atmosphère prédominante réductrice pendant toutes les cuites d'essai. Le haut durcissement des vases est possible sous les températures basses de la cuite ($700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$) seulement sous une atmosphère de cuite réductrice-hydrothermale. La valeur limite de la température de ce type de poêle est environ de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le poêle est à utiliser pour de nombreuses cuites malgré des réparations nécessaires du manteau du poêle et de l'ouverture de l'aire. Avec un remplissage de poêle de 150 vases au maximum et une durée du processus de cuite de 2 - 3 jours on peut estimer une production annuelle à 7500 - 9000 vases.

Une telle productivité suppose une production de marchandises - portée par les artisans -, qui pouvait satisfaire les besoins d'un grand cercle des acheteurs.

6. La coopération interdisciplinaire entre des archéologues et des spécialistes de la technique de procédée a rempli totalement méthodiquement et objectivement les buts fixés:

La production des céramiques grises. Pour la première fois il y a réussi la surveillance technique liée avec une mesure détaillée de l'atmosphère de poêle et de la température de cuisson et la reconstruction - assurée par des données d'expérience - du processus de la production d'un atelier de potier du tour du 3^{ème} siècle de notre ère en Thuringe travaillant selon la technologie et la structure de l'entreprise romaine.

Summary

1. Since 1979 in Haarhausen near Arnstadt is excavated - first in the province Thuringia - a Roman-Germanic pottery from about 300 A. D. In the course of these works a kiln for burning of wheel-made pottery was investigated too. The state of the kiln and some details of the construction provided sufficient fundamentals for the original and serviceable reconstruction of a pottery kiln.
2. The erection of such a kiln and the burning tests were carried out by team work of archaeologists and process engineers. The mostly gray wheel-made pottery found in Haarhausen indicates reducing atmosphere during the firing. Furthermore it was started from the idea, that the low maturing temperature of $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$ subject to the dimensions of the kiln only by the influence of the partial pressure of water vapour in the furnace atmosphere results in an irreversible compaction of the ceramic pitchers.
3. The pottery kiln was built adequate to the archaeological model in material and dimensions. As building material were used: 6,6 t clay from local deposits shortened with chaff, 210 pots of a special shape (Wölbtopfe) and 375 moulded bricks from the same material.
4. For each of these five burning tests carried out in this kiln the exact course with all measured values about material, quantities, time and other observations are documented. The principle for the setting was the maximum utilization of the furnace chamber by the loose arrangement of the vessels. The firing is divided in several stages. The procedure of firing was determined by the dimensions of the kiln and the reducing burning conditions. By an average burning temperature of $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$ was found out by measuring of the specific heat consumption and the thermal balance of the kiln, that the external temperatures and the water table do not limit the operation time of the kiln. The burning tests show convincingly that it is not so difficult to produce the reducing atmosphere in the kiln, which is necessary to burn the gray ceramics, during the heating-up and the maturing period. It is more difficult to get the partial pressure of water vapour needed for the compaction and to avoid infiltration air during the cooling period.
5. Test-specimens burnt in the pottery kiln show values for the tensile bending strength which are identical with values of the products of the large-scale "Hydrit" - kiln in the brickworks in Niedertopfstedt.

The predominant reducing burning conditions during all five burning tests demonstrate the gray colouring of vessels arranged in saggers.

The high compaction of the vessels by the low burning temperatures ($700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$) is only possible under reducing-hydrothermal burning conditions. The limit of temperature of this type of kiln for reducing burning conditions amounts to $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. The kiln is useable for numerous burnings although some repairs of shell and the perforated floor of the kiln are necessary.

By a furnace charge of maximum 150 vessels and a duration of the burning process of 2 - 3 days we can calculate annual production of 7500 - 9000 vessels.

Such a productivity presumes a commodity production - carried out by workmen - which can satisfy the requirements of a great number of customers.

6. The team work between archaeologists and process engineers has methodically and objectively fulfilled the aim envisaged: the production of gray ceramics. For the first time the measuring and the control of the atmosphere in the kiln and the burning temperature were carried out successfully as well as the reconstruction of the production process of a pottery of the 3rd century in Thuringia working according to a Roman technology and operating structure.

Обобщение

1. С 1979 г. в городе Хархаузен, районе города Арнштадт, в первый раз в Тюрингии занимаются раскопкой римско-древнегерманской гончарни третьего века нашей эры и одновременным исследованием гончарных печей для обжига керамики, изготовленной на гончарном круге. Состояние и сохранение печей и некоторые строительные детали достаточно являются основой для работоспособной реконструкции гончарной печи, соответствующей оригиналу.
2. Строительство печи по готовому образцу и опытные обжиги проведены в сотрудничестве между археологами и технологами. Найденная в г. Хархаузен преимущественно серая керамика, изготовленная на гончарном круге, сигнализирует редуцирующую атмосферу обжига. Исходили из предположения, что определенные пропорциями печи низкие температуры окончательного обжига в $700^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$ только под влиянием парциального давления водяного пара в атмосфере печи вызывают необратимое упрочнение керамического черепка.
3. Построена по археологическим образцам материалов и размеров работоспособная печь. Строительным материалом служило 6,6 т глины местных вскрытий, отощенной сечкой, а также 210 печных изразцов и 375 штучных камней.
4. Протоколированы измерительные данные о материале, количественные данные и данные времени, другие наблюдения и подробный ход проведенных в этой печи пяти опытных обжигов. Принципом садки считалось максимальное использование пространства печи путем неплотного расположения сосудов.

Топку можно подразделять в некоторые фазы. Определяющими факторами для теплотехники были пропорции печи и редуцирующий обжиг. При средней температуре окончательного обжига в $700^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$ в результате определения удельного расхода тепла и теплового баланса печи установлено было, что наружная температура и уровень грунтовых вод не являются временными ограничивающими факторами для хода печи.

В опытных обжигах подтверждено было, что не трудно соблюдать при подогреве и окончательном обжиге редуцирующую атмосферу печи, необходимую для обжига серой керамики. В противоположность этому охлаждение требует особой тщательности, чтобы создавать необходимое для упрочнения парциальное давление водяного пара и надежно избегать подсосывания воздуха через неплотности.

5. Данные анализов растягивающей прочности на изгиб сообоженных проб по отношению упрочнения идентичны с данными продуктов промышленной гидридной печи на кирпичном заводе в г. Нидертонфштедт. Преобладающая редуцирующая атмосфера обжига во время всех опытных обжигов обеспечивает образование серого оттенка вставленных друг в друга сосудов.

Высокое упрочнение сосудов при низких температурах обжига ($700^{\circ}\text{C} \pm 35\text{ K}$) возможно только в редуцирующей гидротермальной атмосфере обжига. Предельная величина температуры в описанном типе печи составляет 800°C для условий редуцирующего обжига. Несмотря на необходимый ремонт кожуха печи и загрузочного отверстия печь применима для многочисленных процессов обжига.

При максимальной погрузке печи в 150 сосудов и при времени обжига в 2 до 3 дня можно предполагать годовую продукцию в 7500 до 9000 сосудов. Предпосылкой такой производительности является ремесленное товарное производство, удовлетворяющее потребности большого круга покупателей.

6. Археологи и технологи в междисциплинарном сотрудничестве вполне выполнили в методическом и деловом отношении поставленные цели — производство серой керамики. В

первый раз в Тюрингии удалось подробный измерительный контроль печной атмосферы и температуры обжига и реконструкция на основе опытных данных производственного процесса гончарни с гончарным кругом, работающей по римской технологии и производственной структуре третьего века нашей эры.

7. ANMERKUNGEN

1. Für anregende Fachdiskussionen danken wir Herrn Restaurator U. Lappe, Museum für Ur- und Frühgeschichte Thüringens, Weimar.
2. Für die Durchführung dieser Untersuchungen danken wir Herrn Dipl.-Chem. H.-G. Ratzeberger, Institut für Bau- und Grobkeramik, Weimar.
3. Frau Dr. H. Jacob, Jena, gilt für die Holzartbestimmung aufrichtiger Dank.
4. Die Gesamtvorlage der Grabungsergebnisse von Haarhausen und deren Auswertung erfolgt in der Reihe "Weimarer Monographien zur Ur- und Frühgeschichte".
5. Herrn Dr. R.-D. Bleck und Frau M. Böhmel, beide Museum für Ur- und Frühgeschichte Thüringens, Weimar, verdanken wir die Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit, die naß-chemische Analyse einiger Scherben und das Nachglühen einiger Proben an archäologischen Scherben.
Herrn Dr. Höppner, Zentralinstitut für anorganische Chemie der Akademie der Wissenschaften der DDR, Berlin, sei herzlichst für die Durchführung von Röntgenfluoreszenzanalysen gedankt.
6. Die C^{14} -Analyse wurde durch das Entgegenkommen von Dr. H. Quitta im Labor des Zentralinstituts für Alte Geschichte und Archäologie der Akademie der Wissenschaften der DDR in Berlin von Herrn Dr. Kohl durchgeführt. Für die Überlassung der Ergebnisse sind wir sehr zu Dank verbunden.
7. Herrn Dr. H. Busch, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar, gebührt aufrichtiger Dank für aktive Mitarbeit bei den ersten Brennversuchen, besonders bei der Lösung stofflicher Probleme und bei der Aufbereitung des gegrabenen Tones.
8. Am Ofenbau beteiligten sich außer den Autoren dieser Publikation die Kollegen G. Blumenstein, N. Eichelmann, W. Gall, H.-J. Leithner und G. Möbes, alle Museum für Ur- und Frühgeschichte Thüringens in Weimar. Für die erfolgreiche Zusammenarbeit sei ihnen allen aufrichtig gedankt.
In diesen herzlichen Dank möchten wir Frau A. Schau, Frl. I. Nestler und Herrn R. Hüttmann für vielseitige Hilfe bei der Organisation der Brennversuche, Herrn A. Roscher für die Anfertigung der zahlreichen Zeichnungen, Frau B. Stefan für das Farbfoto und Frau Ch. Gottschalk für die Reinschrift des Manuskriptes als Druckvorlage, alle Museum für Ur- und Frühgeschichte Thüringens, Weimar, einschließen.
9. Vgl. geologische Expertise von Herrn Dr. H. E. Schneider, IBK Weimar.
10. Die Gefäße des Besatzes für den 1. Brand und die Wölbtpfe drehte Herr Specht, Arnstadt.
11. Dem damaligen Direktor des Betriebsteils Niedertopfstedt des VEB Thüringer Ziegelwerke Erfurt, Herrn Dr.-Ing. S. Plüschke, sind wir für vielseitige Unterstützung und Hilfe bei unseren Versuchsbränden zu großem Dank verbunden.
12. Besonderen herzlichen Dank schulden wir den anerkannten Kunsthandwerkern und Meistern des Töpferhandwerks, Frau Ch. Finger, Weißensee, Frau S. Sieler, Weißensee, Frau F.-U. Schmidt, Erfurt, und Herrn W. Krause, Hermstedt, für ihre großzügige Unterstützung unserer Brennversuche, die mit ihrem Erfahrungsschatz sehr zum Gelingen der Brände beitrugen.
13. Zu diesen und anderen Fragen durften wir den Rat des anerkannten Kunsthandwerkers und Töpfermeisters, Herrn W. Gebauer, NPT, Bürgel, einholen. Ihm danken wir für lehrreiche Konsultationen.
14. Für die durchgeführten Berechnungen ist Herrn L. Vehmever, VEB Spezialbaukombinat Magdeburg, zu danken.

8. LITERATUR

- Behm, G.: Die germanischen Töpferöfen von Falkensee, Kr. Osthavelland. - Nachrichtenbl. f. Dt. Vorz. 17 (1941) S. 210 - 229. Leipzig.
- Behm-Blancke, G.: Kunst und Gesellschaft der Germanen. - Dresden, 1973.
- Bersu, G.; Goessler, P.; Paret, O.: Römische Töpferöfen bei Weil i. Schönbuch, Walheim und Weizheim. - Fundber. aus Schwaben 4 (1917) S. 119 - 135. Stuttgart.
- Bimson, M.: A Note on the Use of Colour Change on Refiring as an Indication of the Original Firing Temperature of Terra Sigillata. - Acta praehist. et archaeol. 9/10 (1978/79) S. 5. Berlin.
- Blahuta, F.: Nálezy na sídlisku 2 v Prešove v rokoch 1961 - 1962. - Študijné zvesti AU SAV 11 (1963) S. 153 - 168. Nitra.
- Bryant, G. F.: Romano-British experimental kiln firings at Barton-on-Humber, England, 1968-1975. - Acta praehist. et archaeol. 9/10 (1978/79) S. 13 - 22. Berlin.
- Bülow, G. v.: Die Keramikproduktion. - In: Die Römer an Rhein und Donau. - Berlin, 1975. - S. 230 - 269. - (Veröff. Zentralinst. f. Alte Gesch. u. Archäol. Akad. d. Wiss. d. DDR; 3).
- Buratyński, St.: Rzemieślnicza produkcja ceramiki siwej, toczonej z okresu wpływów rzymskich w Nowej Hucie i Igołomi. - In: Kultury archeologiczne i strefy kulturowe w Europie Środkowej w okresie wpływów rzymskich. - Warszawa [u. a.], 1976. - S. 89 - 112. - (Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego; 422; Prace archeologiczne; 22).
- Dreus, G.: Entwicklung der Keramik-Brennöfen. - Acta praehist. et archaeol. 9/10 (1978/79) S. 33 - 48. Berlin.
- Dusek, S.: Die Produktion römischer Drehscheibenkeramik in Thüringen - Technologie, ökonomische und gesellschaftliche Konsequenzen. - In: Römerzeitliche Drehscheibenware im Barbarikum. - Weimar, 1984. - S. 5 - 18. - (Weimarer Monographien zur Ur- und Frühgesch.; 11).
- Spätromische Drehscheibenkeramik Thüringens in technologischer und sozial-ökonomischer Sicht. - In: Produktivkräfte und Produktionsverhältnisse. - Berlin, 1985. - S. 285 - 290.
- Dušek, S.; Hohmann, H.: Interdisziplinäres Forschungsprogramm zur Produktion spätkaiserzeitlicher Drehscheibenkeramik in Thüringen und zur Bedeutung des hydrothermalen Brandes in ur- und frühgeschichtlicher Zeit. - Auf 26 (1981) S. 217 - 223. Berlin.
- Eggers, H. J.: Zur absoluten Chronologie der römischen Kaiserzeit im Freien Germanien. - Jo. Röm.-Germ.-Zentralmus. 2 (1955) S. 196 - 244. Mainz.
- Fasshauer, P.: Technologische Auswertung des Grabungsbefundes spätlatènezeitlicher keltischer Töpferöfen. - Jschr. mitteldt. Vorgesch. 43 (1959) S. 245 - 287. Halle.
- Fridrich, J.: Mladofínská keramická pec z Mutějovic u Rakovníka. - Archeol. rozhl. 16 (1964) S. 589 - 593. Praha.
- Funck, E.: Römische Töpfereien in Remagen. - Bonner Jb. 119 (1918) S. 322 - 334. Bonn.
- Gajewski, L.: Badania nad organizacją produkcji pracowni garncarskich z okresu rzymskiego w Igołomi. - Archeol. Polski 3 (1959) S. 101 - 158. Warszawa.
- Groenman van Waateringe, W.: Die Grenzen naturwissenschaftlicher Methoden bei der Lösung archäologischer Probleme. - Informationsblätter zu Nachbarwissenschaften der Ur- und Frühgeschichte 6 (1975) S. 1 - 8. Göttingen.
- Günther, R.: Verbrennung und Feuerungen. - Berlin [u. a.], 1974.
- Hampe, R.; Winter, A.: Bei den Töpfern und Töpferinnen in Kreta Messenien und Zypern. - Mainz, 1962.
- Bei Töpfern und Zieglern in Süditalien Sizilien und Griechenland. - Mainz, 1965.
- Heukemes, B.: Römische Keramik aus Heidelberg. - Bonn, 1964. - (Materialien zur Römisch-Germanischen Keramik; 8).
- Hohmann, H.; Krüger, H.-G.; Geilich, J.: Die hydrothermale Verfestigung toniger Massen nach dem Hydratverfahren. - Silikattechnik 22 (1971) S. 115 - 120. Berlin.
- Hohmann, H.; Plüschke, S.: Inbetriebnahme des Ziegelwerkes Niedertopfstedt auf der Grundlage des Hydratverfahrens. - Baustoffindustrie 24 (1981) S. 47 - 50. Berlin.
- Holmes, W. H.: Why Rapid Firing is Possible. - J. Brit. Ceram. Soc. 6 (1969) S. 19 - 22. Stoke on Trent.
- Houseman, J. E.; Koenig, C. J.: Influence of Kiln Atmospheres in Firing Structural Clay Products: I) Maturation and Technological Properties; II) Color Development and Burnout. - Journal of the American Ceram. Soc. 54 (1971) S. 75 - 89. Columbus/Ohio.
- Huld-Zetsche, I.: Irierer Reliefsigillata-Werkstatt I. - Bonn, 1972. - (Materialien zur Röm.-German. Keramik; 9).
- Janšák, St.: Hrnčiarska dielňa z neskorého laténu v Bratislave. - Slov. Archeol. 3 (1955) S. 195 - 221. Bratislava.
- Klusch, H.: Siebenbürgische Töpferkunst aus drei Jahrhunderten. - Bukarest, 1980.
- Kolník, I.: Rímska stanica v Číferi-Páci (výskum 1975). - Archeologické nálezy a výskumy na Slovensku v roku 1975 (1976) S. 134 - 140. Nitra.
- Krüger, H.: Einfluß des Wasserdampfpartialdruckes der Gasphase auf die Phasenbildungsreaktionen beim hydrothermalen Brennen von Tonen. - Weimar, 1971. - (Diss.).
- Kaufmann, H.: Ein latènezeitlicher Töpferofen am Fischhaus bei Gotha. - Alt-Thür. 6 (1962/63) S. 436 - 454. Weimar. - (Neumann-Festschrift).
- Kramarkowa, I.: Sprawozdanie z badań wykopaliskowych na osadzie z okresu wpływów rzymskich w Radwanicach, pow. Wrocław w 1965 roku. - Silesia Antiqua 9 (1967) S. 146 - 178. Wrocław [u. a.].
- La Baume, P.: Frühromische Töpferöfen aus der Lungengasse. - Kölner Jb. f. Vor- u. Frühgesch. 3 (1958) S. 26 - 54. Köln.
- Letsch, J.; Noll, W.: Phasenbildung in einigen keramischen Teilsystemen bei 600 °C bis 1000 °C in Abhängigkeit von der Sauerstoffugazität. - Ber. d. Dt. Keram. Ges. 7 (1983) S. 259 - 266. Wiesbaden.
- Leube, A.; Meyer, E.; Vogt, H.: Römische Kaiserzeit. - In: Typentafeln zur Ur- und Frühgeschichte. - Weimar, 1972.

- Loeschke, S.: Tonindustrie von Speicher und Umgebung. - Trierische Heimatblätter 1 (1922) S. 1 - 28. Trier.
- Die römischen Ziegelöfen im Gemeindewald zu Speicher. - Trierer Zeitschrift 6 (1931) S. 1 - 7. Trier.
- Ludikovský, K.: Výzkum na laténskem sídlišti v Jířkovicích u Brna. - Přehled výzkumu 1959 (1960) S. 67 - 71. Brno.
- Ludowici, W.: Urnengräber römischer Töpfer in Rheinzabern und III. Folge dort gefundener Stempelnamen und Stempelbilder bei meinen Ausgrabungen 1905 - 1908. - Jockgrim, 1908.
- Lamiová-Schmiedlová, M.: Hrnčářská dílna z doby římské v Šebastovciach. - Archeol. rozhl. 14 (1962) S. 800, 806 - 814. Praha.
- Müller, W.; Meyer, H.: Schadstoffemissionen beim Ziegelbrand nach dem Hydratverfahren. - Wiss.-techn. Informationen f. Bau- u. Grobkeramik 4 (1982) S. 4 - 9. Weimar.
- Novotný, B.: Laténská pec z Prahy-Bubenče. - Archeol. rozhl. 4 (1952) S. 275 - 278. Praha.
- Paret, O.: Die römische Töpferei von Waiblingen-Beinstein. - In: Festschrift für August Oxé. - Darmstadt, 1938. - S. 57 - 64.
- Pazda, St.: Ceramika siwa na Dolnym Śląsku w świetle ostatnich odkryć. - Silesia Antiqua 8 (1966) s. 75 - 103. Wrocław.
- Aus Untersuchungen über Probleme der Töpferwerkstätten des 4. - 5. Jh. u. Z. in Niederschlesien. - Archeologia Polona 15 (1974) S. 271 - 298. Wrocław.
- Badania nad problematyką pracowni garncarskich z IV. - V. w. na Dolnym Śląsku. - Studia Archeologiczne 7 (1976) S. 165 - 203. Wrocław. - (Acta Universitatis Wratislaviensis; 253).
- Perníčka, R. M.: Hrnčářská dílna ze sklonku II. století n. l. v Chřelicích (okr. Brno-venkov). - Přehled výzkumu 1967 (1968) S. 59 - 60. Brno.
- Nakruhu vytvářená keramika jížkovičského typu z mladší doby římské v dosavadních výzkumech a literatuře. - In: Sborník J. Poulikovi k šedesatinám. - Brno, 1970. - S. 76 - 81.
- Peškar, I.: Sídlištní nálezy z neolitu, doby bronzové, laténské, římské, slovanské a středověku v Lulči (okr. Vyškov). - Přehled výzkumu 1974 (1975) S. 40. Brno.
- Pieta, K.: Sídliště z doby římské v Beluši. - Slov. Archeol. 22 (1974) S. 89 - 106. Bratislava.
- Planck, D.; Röske, H.: Römische Töpferöfen aus Benningen, Kreis Ludwigsburg. - Acta praehist. et archaeol. 9/10 (1978/79) S. 135 - 143. Berlin.
- Plüschke, S.: Die Beschaffenheit der Ziegelrohstoffe des Thüringer Beckens und ihre Eignung für das Hydratverfahren im Vergleich zum herkömmlichen Brennverfahren unter Beachtung der Erfahrungen im Hydratwerk Niedertopfstedt. - Weimar, 1985. - (Diss.).
- Princ, M.; Skružný, L.: Laténská hrnčářská pec v Brčkélech. - Pam. Archeol. 68 (1977) S. 164 - 192. Praha.
- Quak, K.: Technisches Wissen. - Teil 1, Teil 3. - Leipzig, 1955.
- Rada, P.: Techniken der Kunsttöpferei. - Prag [u. a.], 1960.
- Rau, H. G.: Die römische Töpferei in Rheinzabern. - Mitt. hist. Ver. d. Pfalz 75 (1977) S. 47 - 73. Speyer.
- Reutti, F.: Tonverarbeitende Industrie im römischen Rheinzabern. Vorbericht für die Grabungen der Jahre 1978 - 1981. - Germania 61 (1983) S. 33 - 69. Mainz am Rhein.
- Reyman, T.: Problem ceramiki siwej na kole toczonej na tle odkryć w górnym dorzeczu Wisły. - Wiadomości Archeol. 13 (1935) S. 147 - 175. Warszawa.
- Schirmer, E.: Ein germanischer Töpferofen aus der Flur Niederroßla, Landkreis Weimar. - Spätforscher 6 (1941) S. 22 - 32. Jena.
- Schmid, E. E.: Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten. XXXIX. Lieferung. Blatt Arnstadt. - Berlin, 1889.
- Schmidt, B.: Die münzdatierten Grabfunde der spätrömischen Kaiserzeit im Mittelbe-Saale-Gebiet. - Berlin, 1982a. - (Inventaria Archaeologica; 1).
- Stand und Aufgaben der Frühgeschichtsforschung im Mittelbe-Saale-Gebiet. - Jschr. mitteldt. Vorgesch. 65 (1982b) S. 145 - 172. Halle/Sa.
- Schneider, H.; Steinhardt, R.; Walter, G.: Untersuchung der Strömungsverhältnisse und der Falschluff an einem Tunnelofen zum Brennen von Ziegeln. - Baustoffindustrie 25 (1982) 4, S. 114 - 117. Berlin.
- Schulz, W.: Das Fürstengrab von Haßleben. - Berlin [u. a.], 1933. - (Römisch-germanische Forschungen; 7).
- Seidel, G.: Lagerstätten und Beschaffenheit der Tone Thüringens sowie ihre Eignung in der Grobkeramik. - Berlin, 1962. - (Freiberger Forschungshefte; C 141).
- Šikulová, V.: Zachráněné výzkumy na přestavbě státní silnice Opava-Krnov (okr. Opava). - Přehled výzkumů 1970 (1971) S. 76 - 77. Brno.
- Hrnčářská pec z mladší doby římské v Holašovicích (okr. Opava). - Přehled výzkumů 1976 (1978) S. 51 - 52. Brno.
- Steiner, P.: Ein Töpferofenmodell aus Nymegen. - Römisch-germanisches Korr.bl. 3 (1910) S. 75 - 76. Trier.
- Thomas, Ch. L.: Töpferöfen in der Römerstadt bei Hedderheim. - Frankfurt a. M., 1894. - S. 13 - 20.
- Thomas, S.: Studien zu den germanischen Kämmen der römischen Kaiserzeit. - Arb.- u. Forschungsber. z. sächs. Bodendenkmalpf. 8 (1960) S. 54 - 215. Leipzig.
- Toepfer, V.: Ein Brennofen aus der Spätlatènezeit von Ermlitz-Oberthau im Kreise Merseburg. - Festschr. d. Röm.-German. Zentralmus. Mainz zur Feier seines 100jährigen Bestehens 3 (1953) S. 72 - 78. Mainz.
- TGL 34329, Gesteinsfarben 12/1979.
- Trudzik, Z.: Z problematyki garncarstwa okresu późnorzymskiego w świetle materiałów z osady we Wrocławiu-Karłowicach. - Silesia Antiqua 13 (1971) S. 163 - 190. Wrocław [u. a.].
- Wagenbreth, O.; Steiner, W.: Geologische Streifzüge. - Leipzig, 1982.
- Weber, H.: Werkstoffparameter Hydrat. - Weimar, 1970. - (Diplomarbeit).
- Wielowiejski, J.: Przemiany gospodarczo-społeczne u ludności południowej Polski w okresie późnolatańskim i rzymskim. - Warszawa, 1960. - (Materiały starożytne; 6).

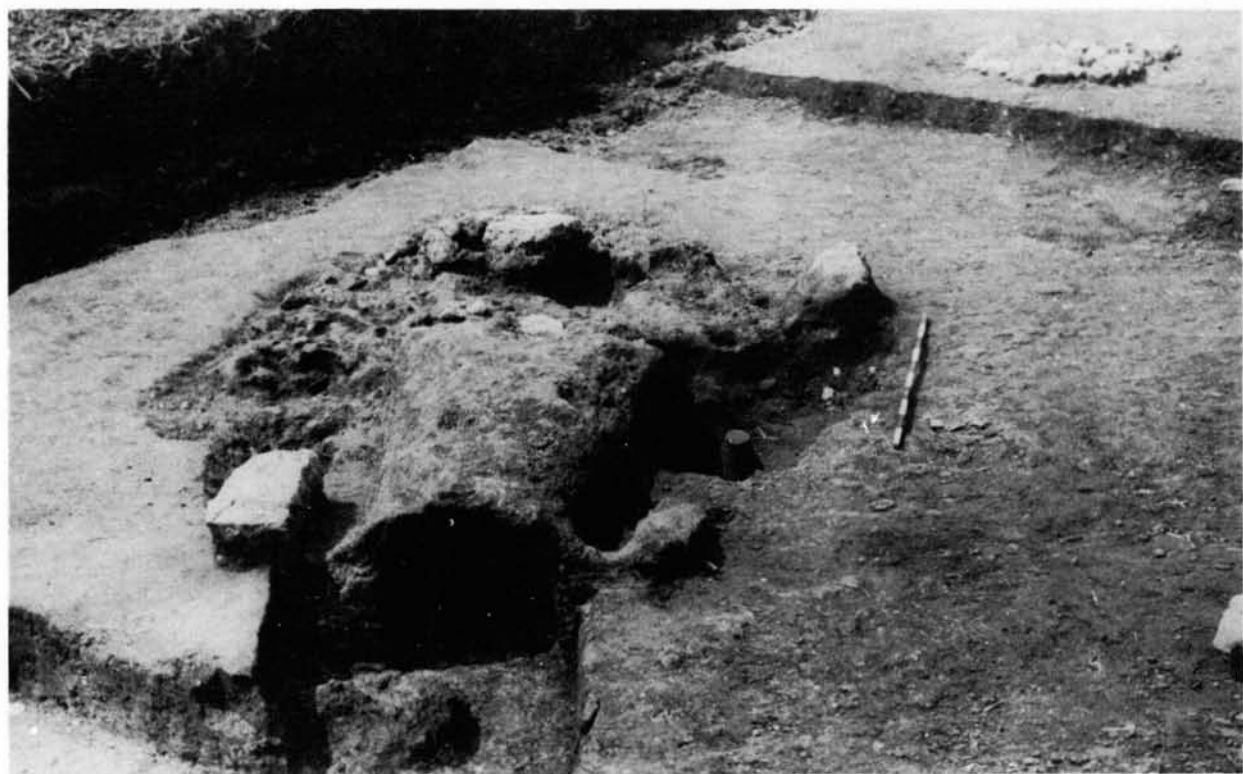
- Winter, A.: Terra sigillata und andere Glanztontechniken. - Keramische Z. 8 (1956) S. 110-113. Lübeck.
- Der römische Töpferofen von Kastel. - Keramische Z. 9 (1957) S. 482 - 484. Lübeck.
 - Antike Glanztonkeramik. - Mainz, 1978.
- Wirska-Parachoniak, M.: Produkcja ceramiczna Celtów na terenach Polski Południowej. - Materiały Archeol. Nowej Huty 6 (1980) S. 29 - 158. Kraków.
- Żaki, A.: Igołomia. Uwagi o małopolskim ośrodku produkcji ceramiki siwej. - Archeologia 3 (1949) S. 342 - 352. Warszawa [u. a.].

Nachtrag

- Busch, H.; Seidel, G.: Zur Ausbildung der Keupertongesteine und zu ihrer Eignung für die Grobkeramik im Hydratbrand. - Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes. 31 (1985) 28, S. 57 - 62. Weimar.



1



2

Haarhausen, Kr. Arnstadt, "Kleines Feld".

1 Töpferöfen I - III im Gelände; - 2 Töpferofen III, vollständig erhaltener Schürhals von Osten



1



2

Haarhausen, Kr. Arnstadt, "Kleines Feld". Töpferofen III.

1 Schürhals und Zerstörungsschicht des Brennraumofenmantels von Westen; - 2 Schürhals und Brennraumzerstörungsschicht von Süden



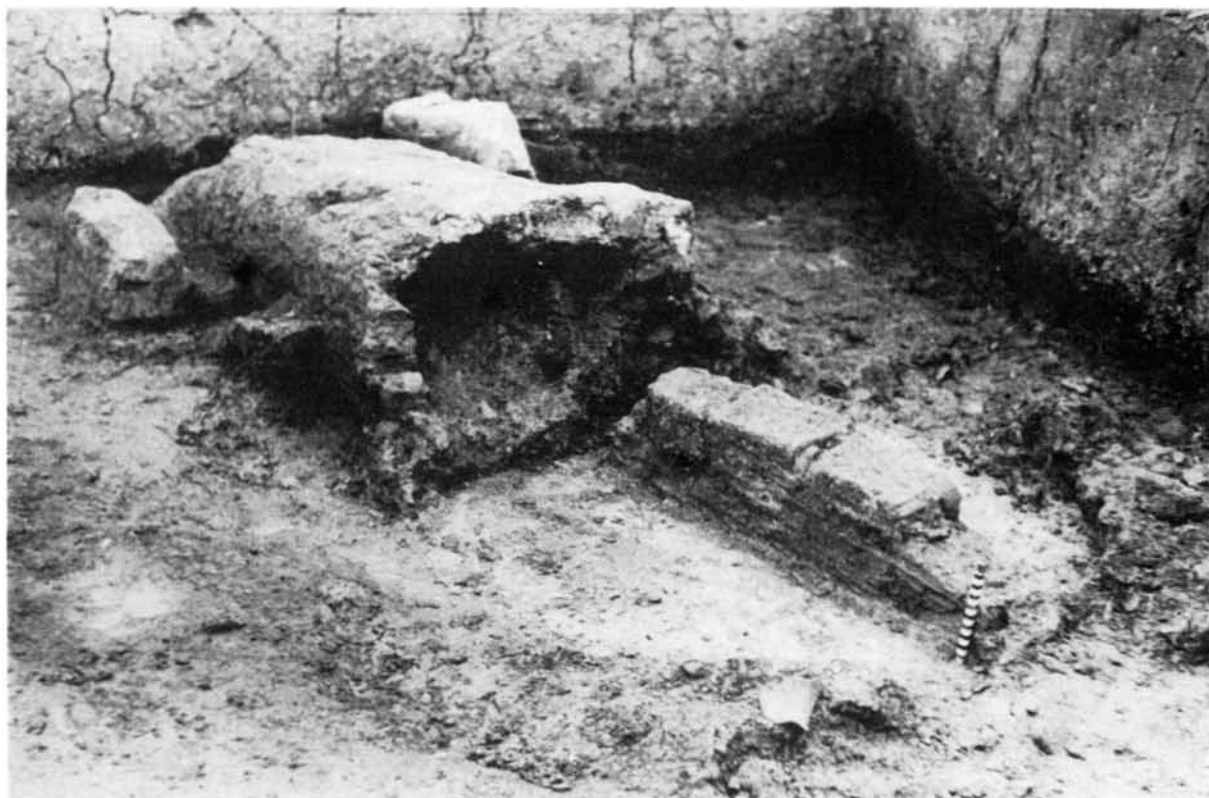
1



2

Haarhausen, Kr. Arnstadt, "Kleines Feld". Töpferofen III.

1 Schürhalsöffnung von Osten; - 2 Schürhals und Brennräumeinfüllschicht von Norden



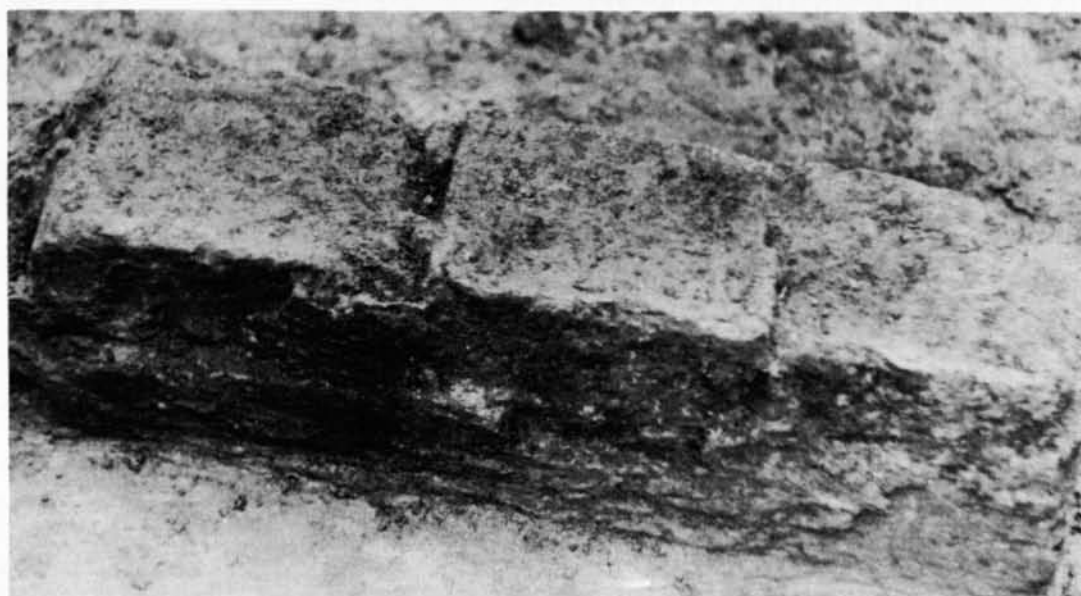
1



2

Haarhausen, Kr. Arnstadt, "Kleines Feld". Töpferofen III.

1 Feuerungsraum mit Steg und anschließendem Schürhals; - 2 Schürhals am Übergang zum Brennraum mit Wölbtöpfen in situ



Haarhausen, Kr. Arnstadt, "Kleines Feld". Töpferofen III.

1 Reste von Wölbtopfen in Einsturzschrift der Brennraumkuppel ; - 2 Steg (Detail), aus Lehmziegeln aufgebaut; - 3 Lehmziegelfragmente und Wandungsreste



1



2

1 Herstellung der Lehmziegel für den Stegbau; - 2 aus Lehm aufgetragene Ofensohle



1



2

Haarhausen, Kr. Arnstadt.

1 Maukruben zur Tonlagerung; - 2 vorgefertigte Lehmziegel, Holzlager

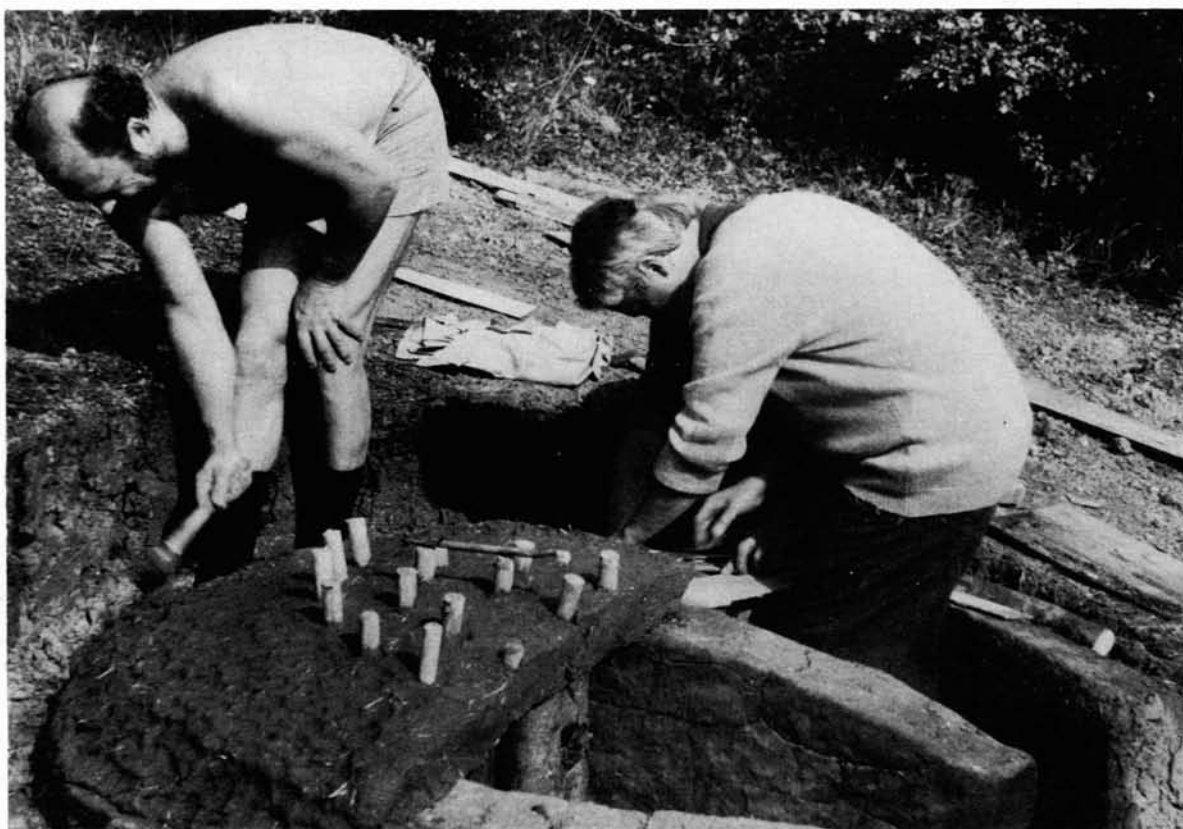


1



2

1 Bau des Steges; - 2 errichteter Steg und beginnende Wandung des Feuerungsraumes aus kleineren Lehmziegeln, dazwischen gestampfte Lehm-Häcksel-Mischung



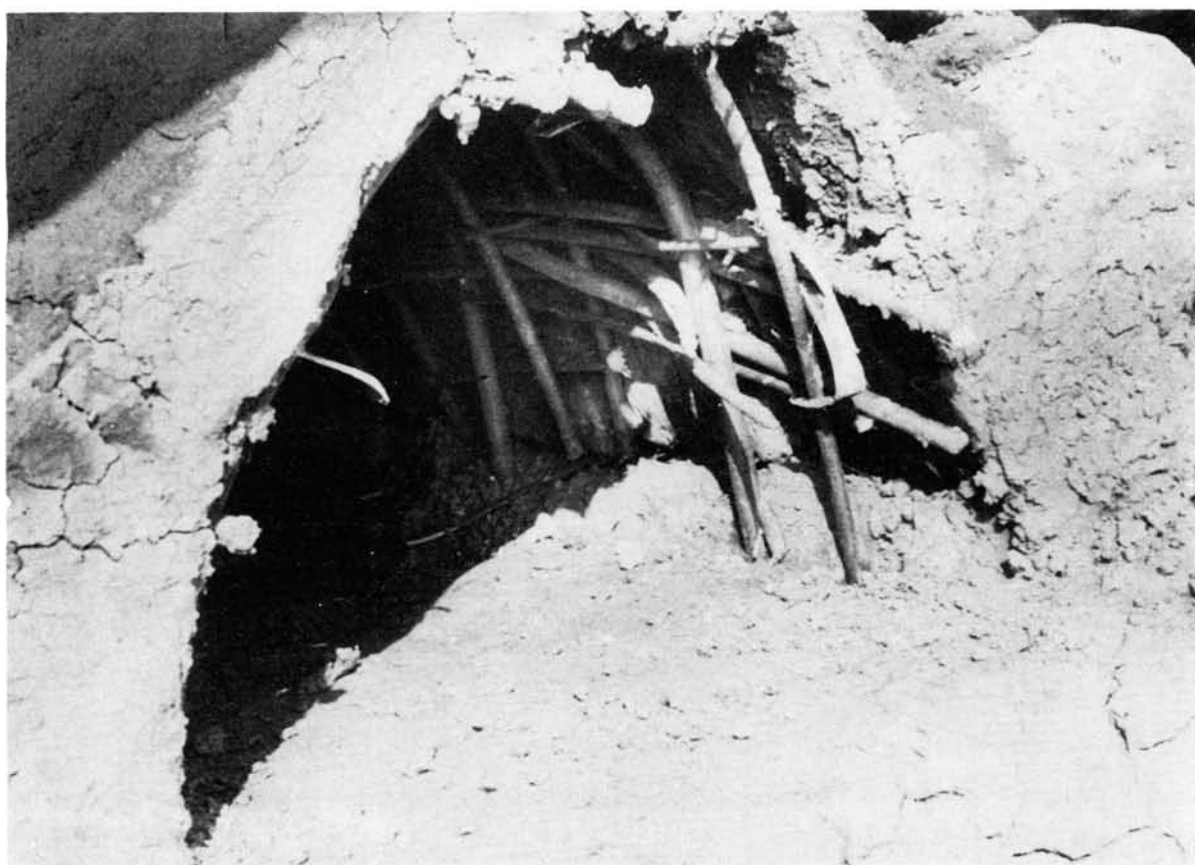
1



2

1 Auflegen und Verdichten der Lochtenne in Segmenten; - 2 Lochtenne mit Pflöcken für die Pfeifenöffnungen und Stützstempel

X

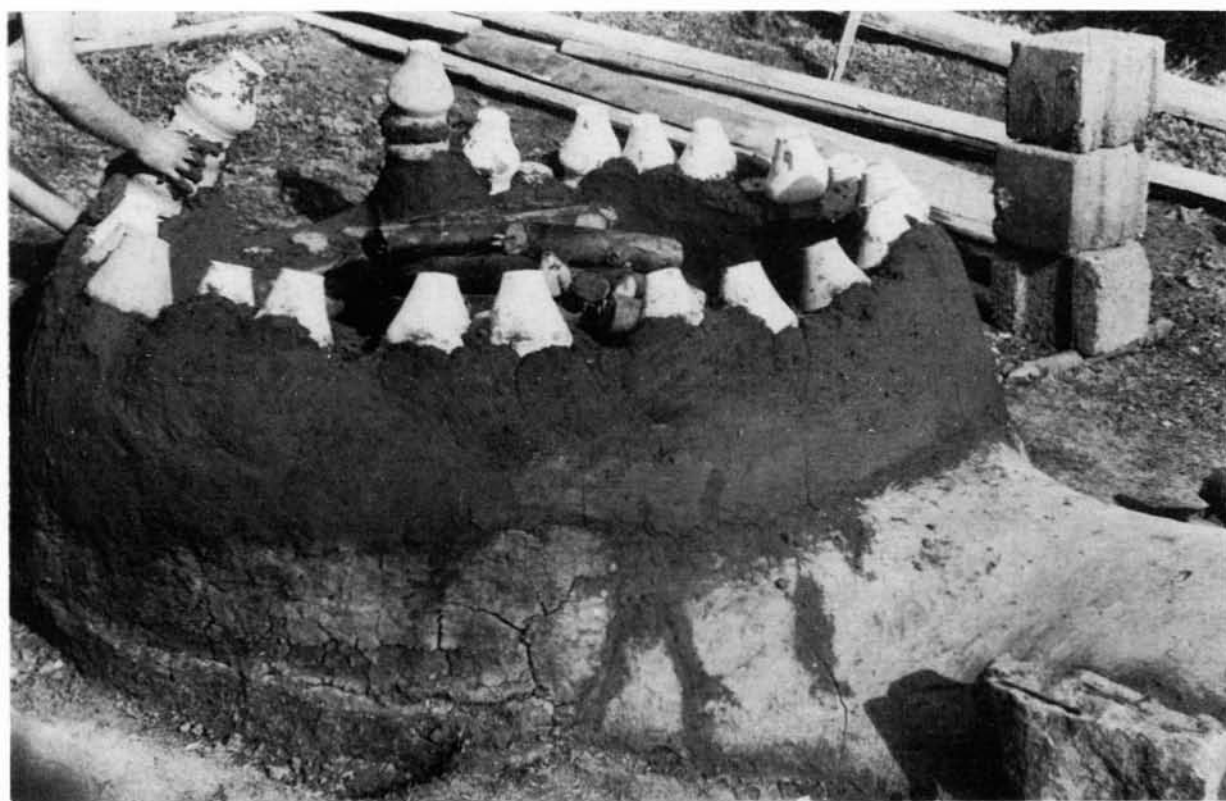


1



2

1 Errichten des Schürhalses über einem Rutengerüst; - 2 vollendeter Schürhals und Abschluß des Feuerungsraumes mit Lochtenne

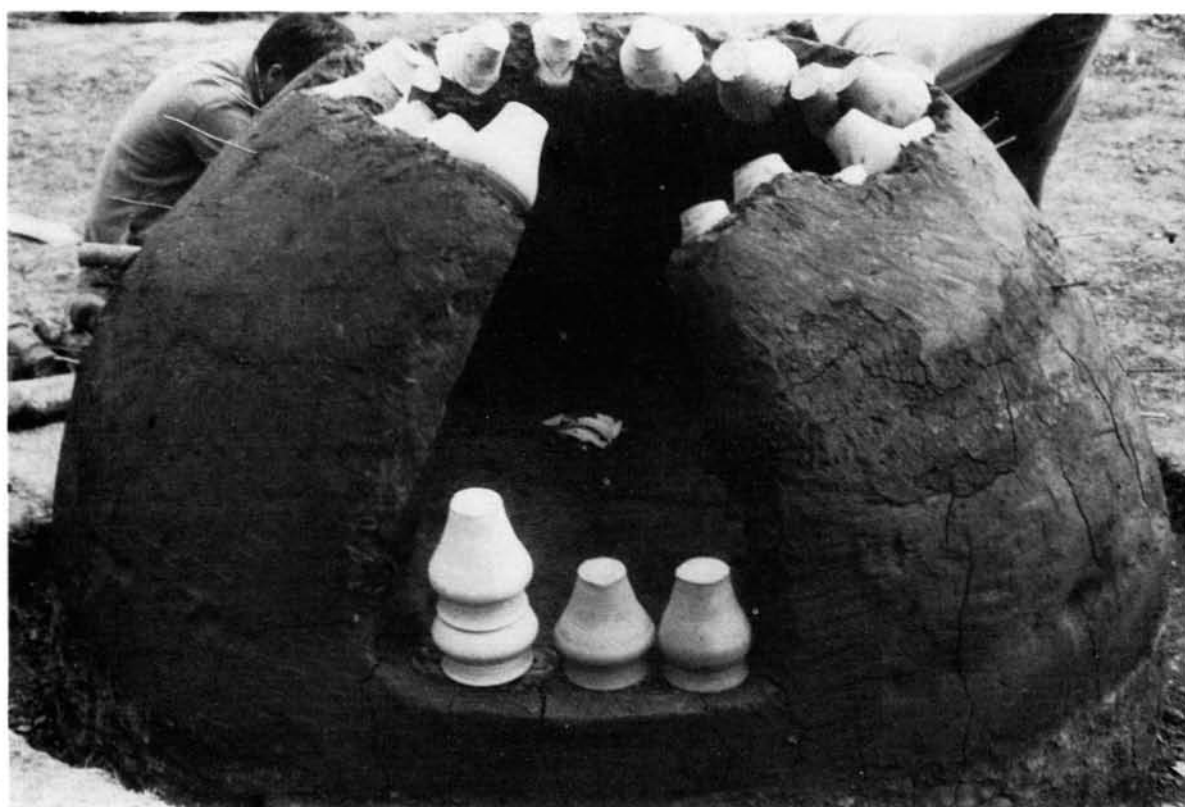


1

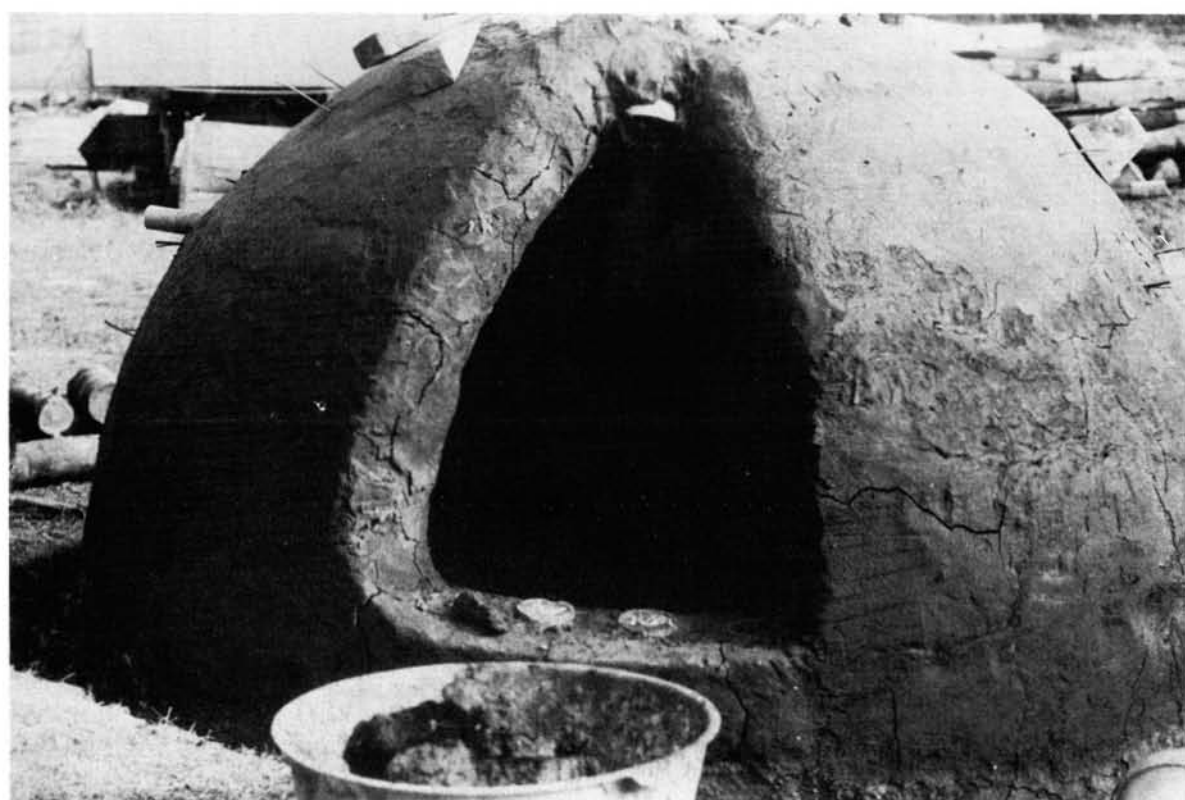


2

1 Aufbau der Brennraumkuppel aus Wölbtopfen, beidseitig mit Lehm-Häcksel-Mischung gut verschmiert; - 2 Wandungsaufbau mit Einsetzöffnung

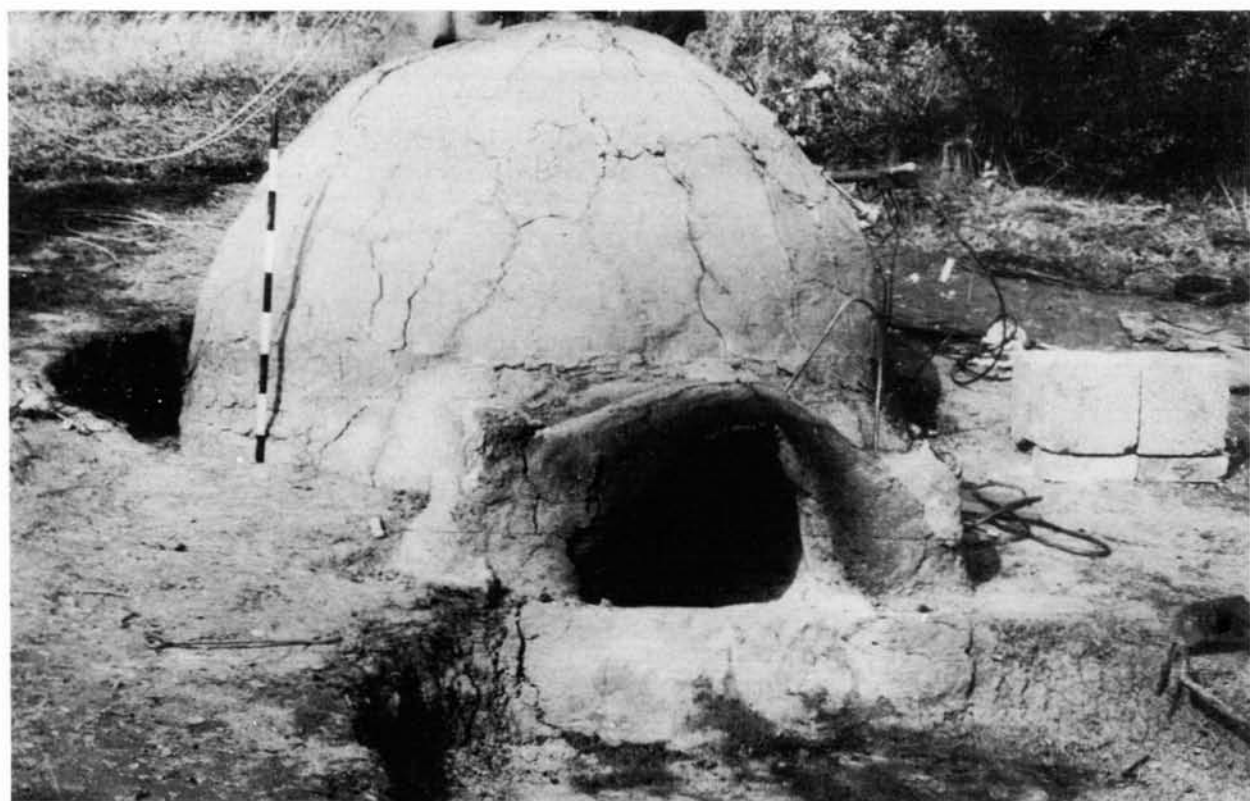


1

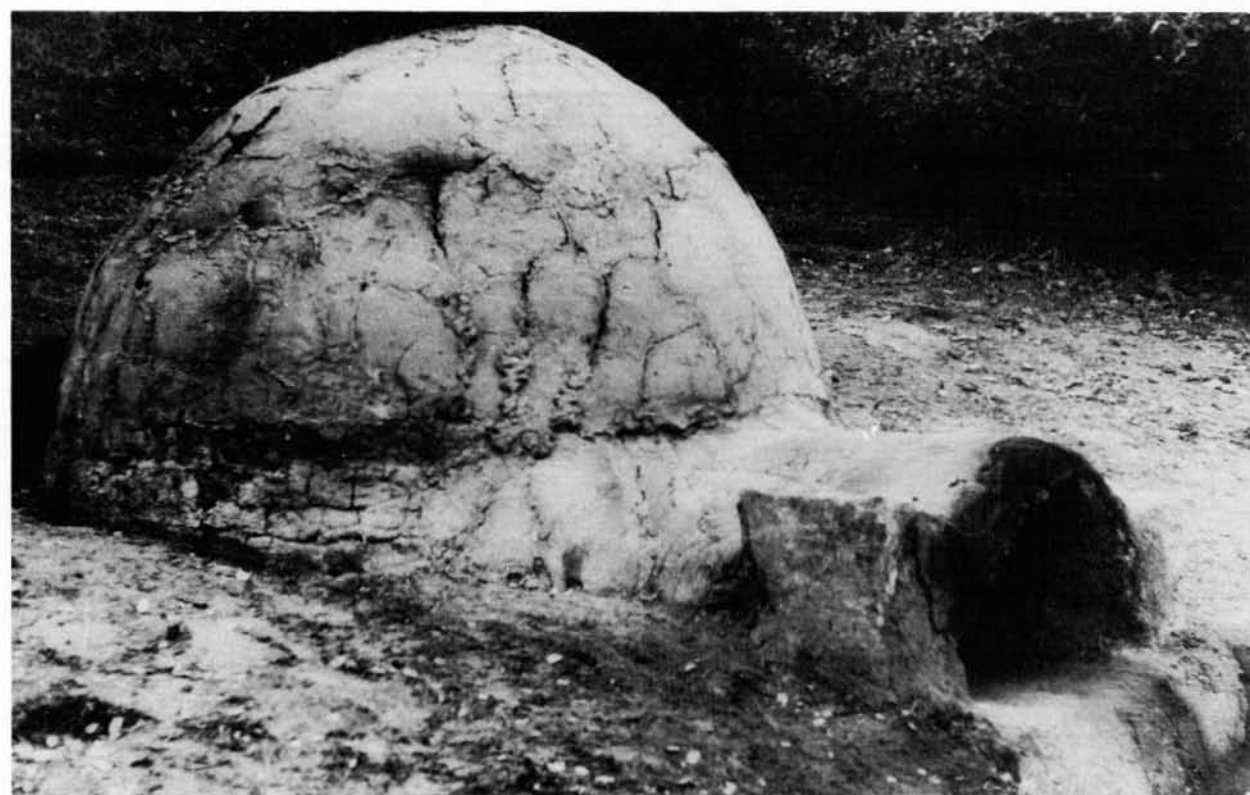


2

1 Aufbaustadium der Brennraumkuppel; - 2 Brennraumkuppel mit vollendeter Einsetzöffnung



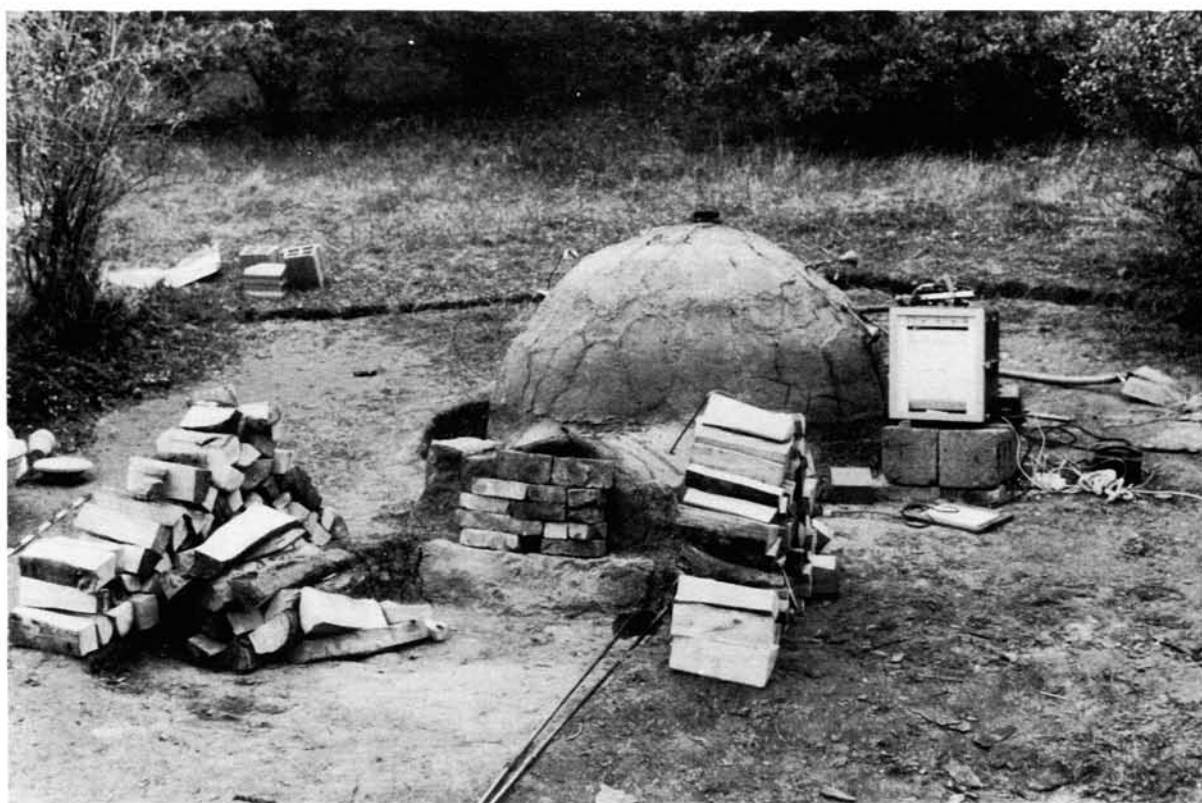
1



2

Rekonstruierter Töpferofen.

1 Vorderansicht; - 2 Seitenansicht



1



2

1 Rekonstruierter Töpferofen mit Brennmaterial und Teil der Meßtechnik; - 2 Töpferofen mit abgedeckter Einsetzöffnung für Temperbrand



1

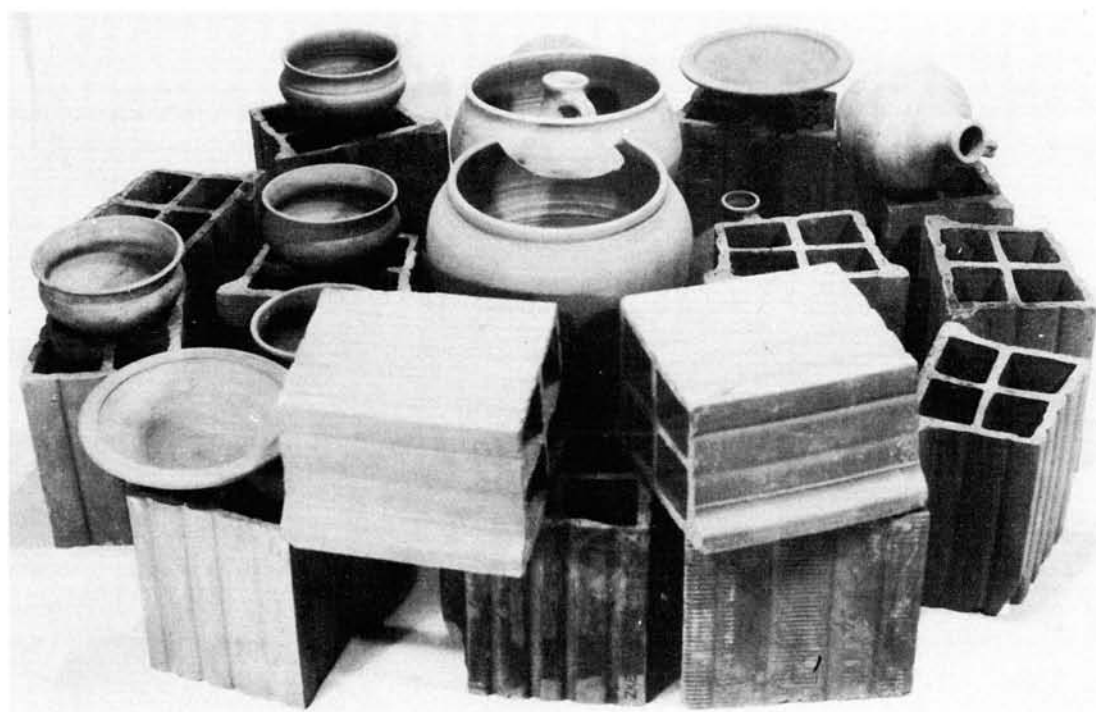


2

1 Verschmieren der Einsetzöffnung nach Beschickung des Ofens; - 2 Verschlüssener Ofen (einschließlich des Rauchgasabzugsloches) während der Kühlphase

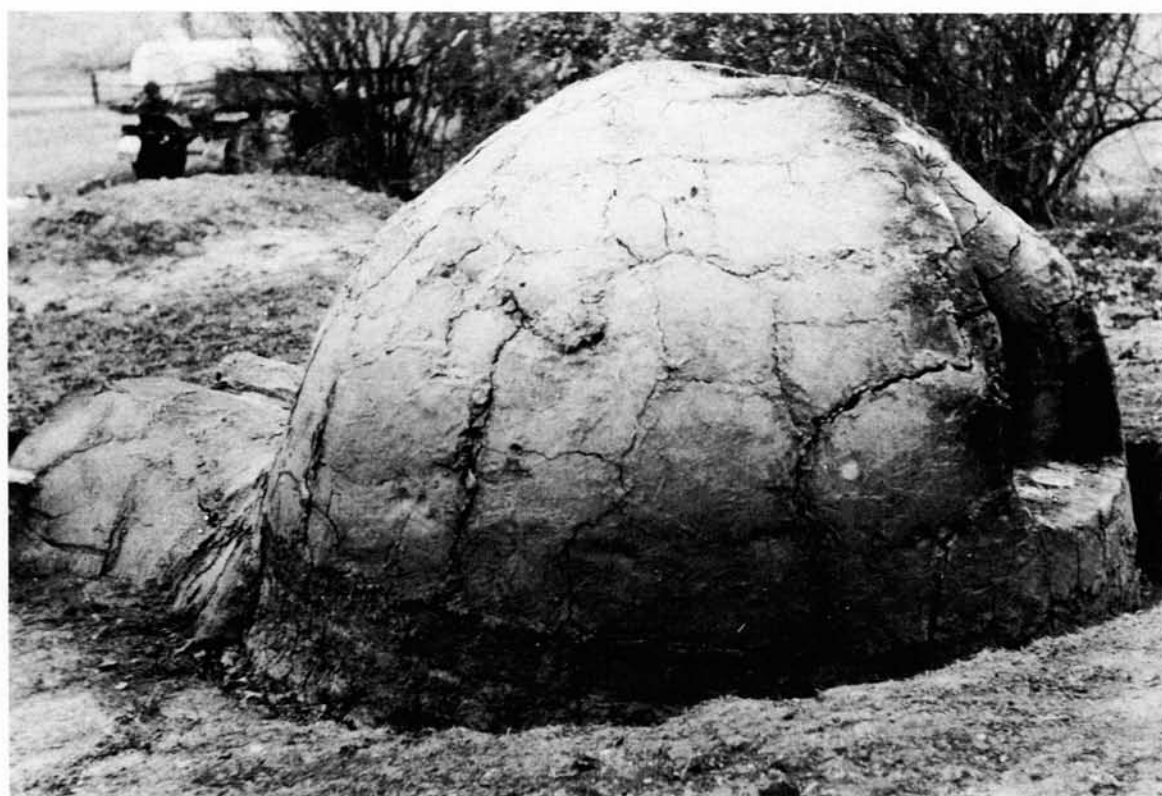


1



2

1 Töpferofen mit Besatz für den 1. Brand; - 2 Besatzmasse 1. Brand



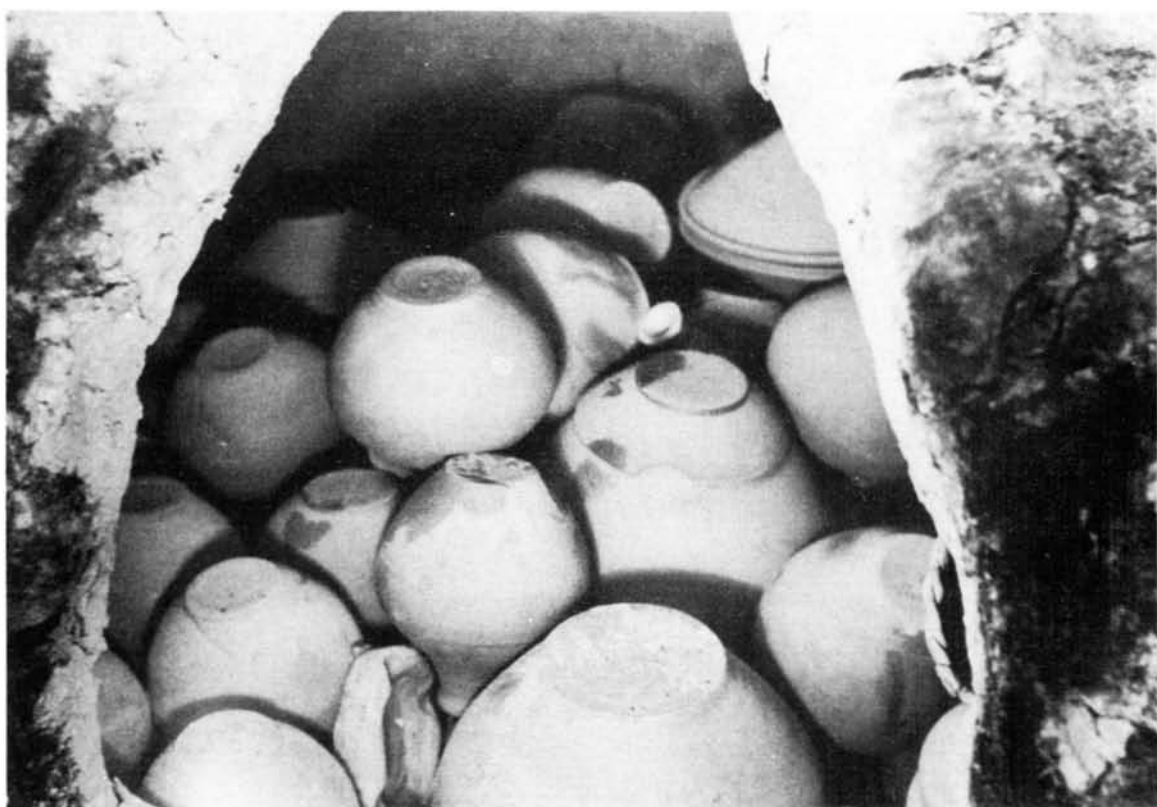
1



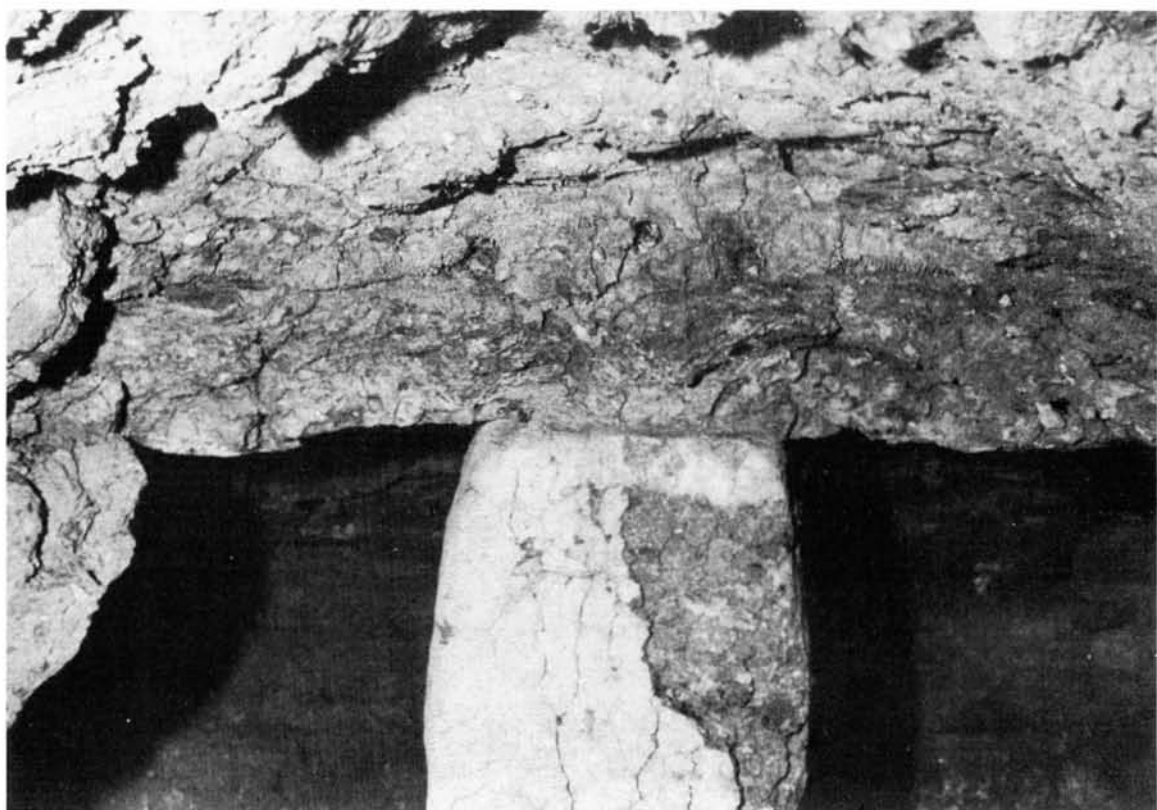
2

Töpferofen nach 1. Brand.

1 Seitenansicht; - 2 Rückansicht mit Einsetzöffnung

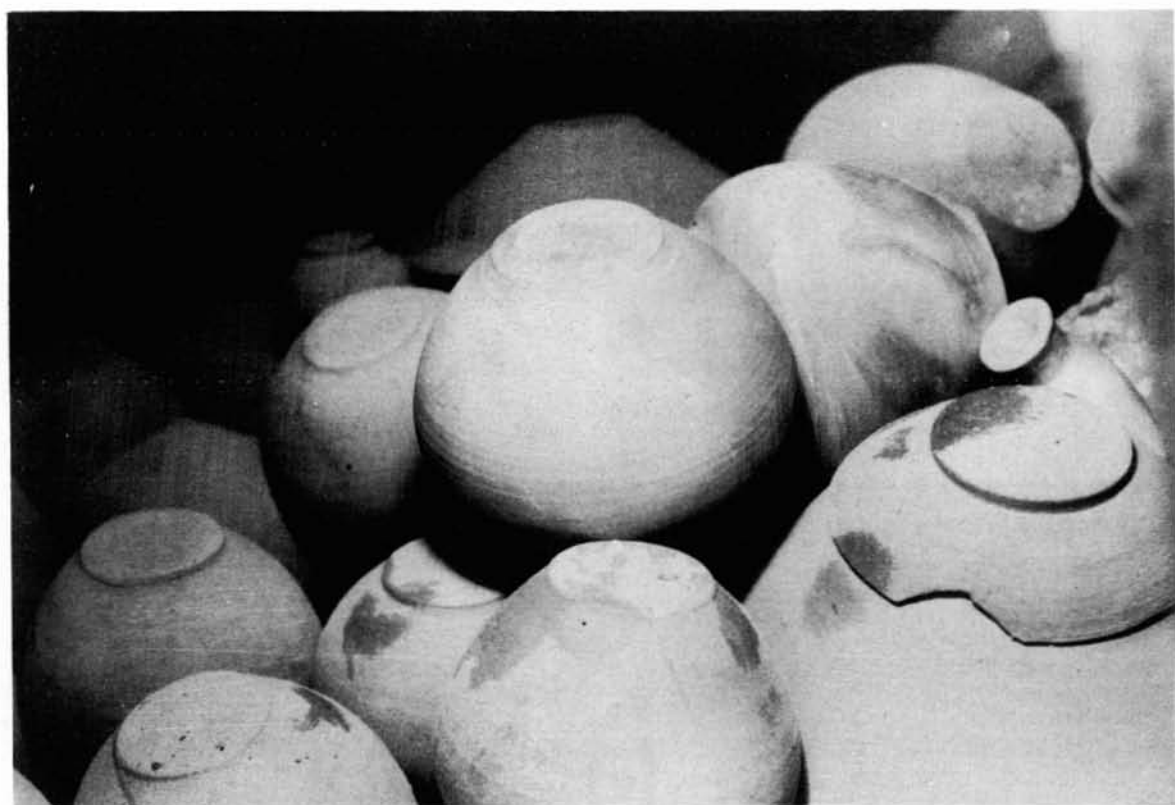


1

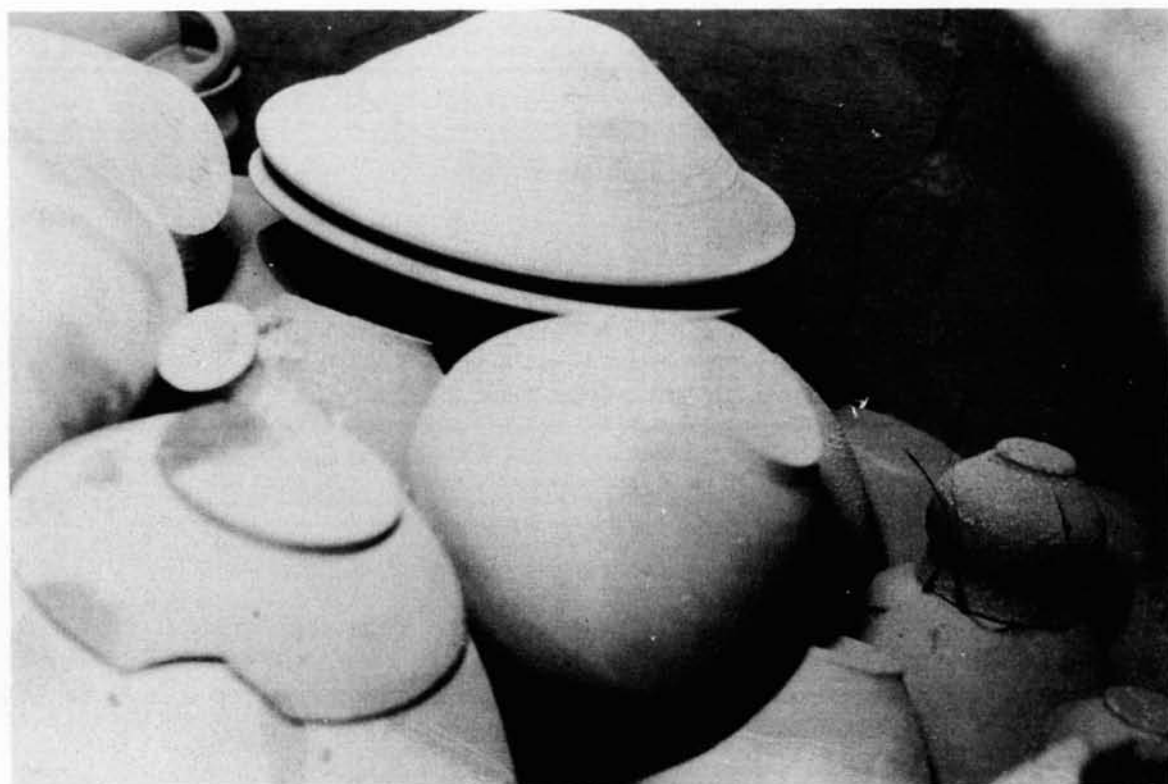


2

1 Blick in den für den 2. Brand beschickten Töpferofen; - 2 Blick durch den Schürhals auf Steg und Unterofen nach dem 1. Brand



1



2

Besatzmasse des 2. Brandes.

1 rechte Ofenhälfte; - 2 linke Ofenhälfte

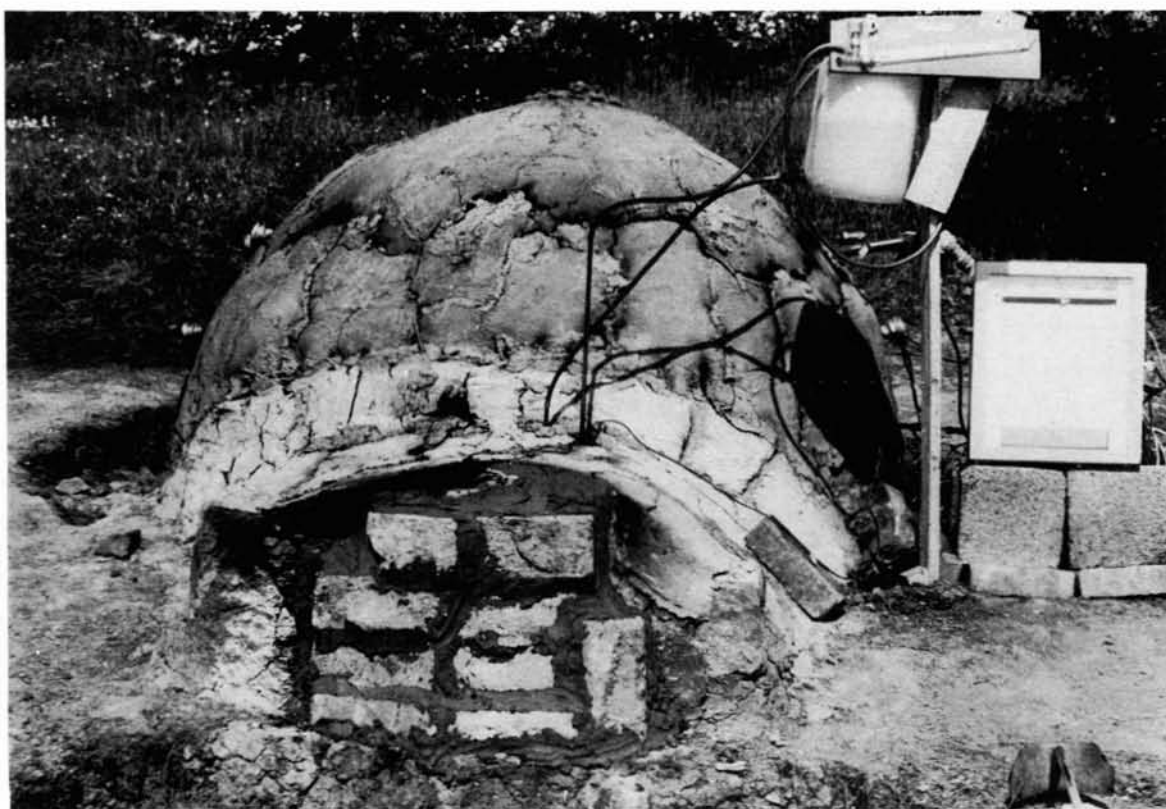


1



2

1 Töpferofen während des 2. Brandes, vorbereitet zum Eindüsen von Wasser für die Kühlung, mit Meßtechnik; - 2 Töpferofen in der Kühlphase nach dem 2. Brand



1

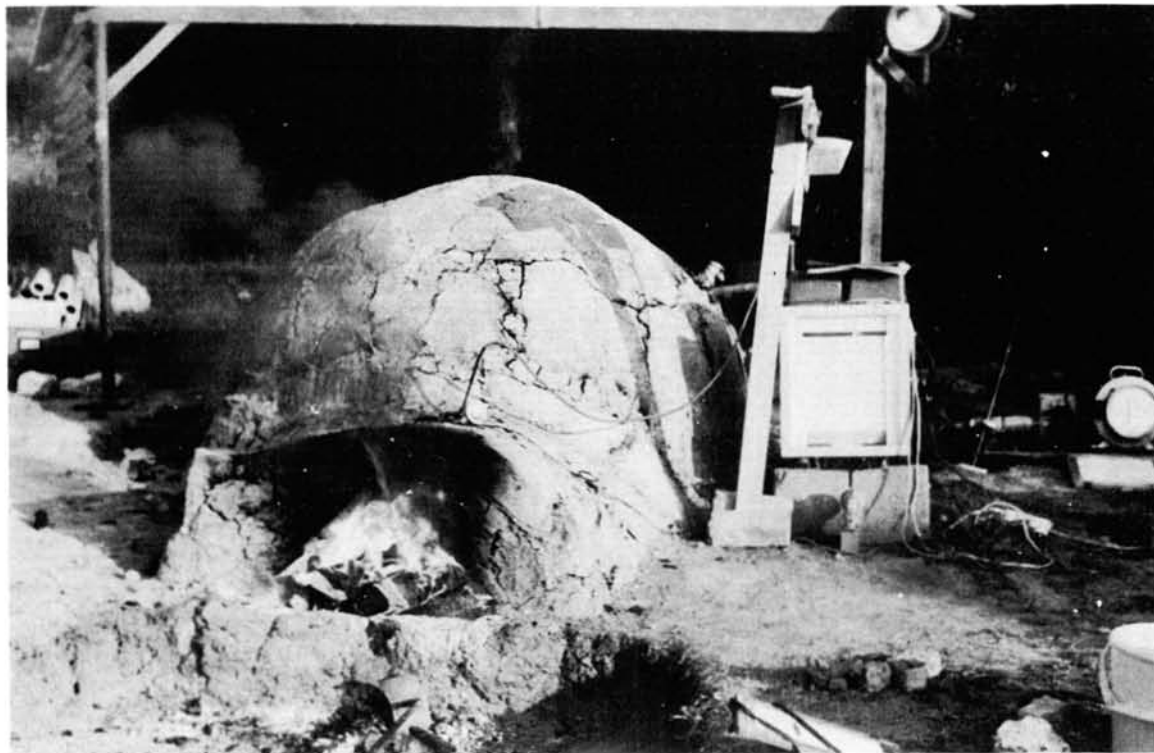


2

1 Wasserkühlung nach dem 2. Brand; - 2 Zusetzen der Schürhalsöffnung vor beginnender Kühlphase, 2. Brand



1

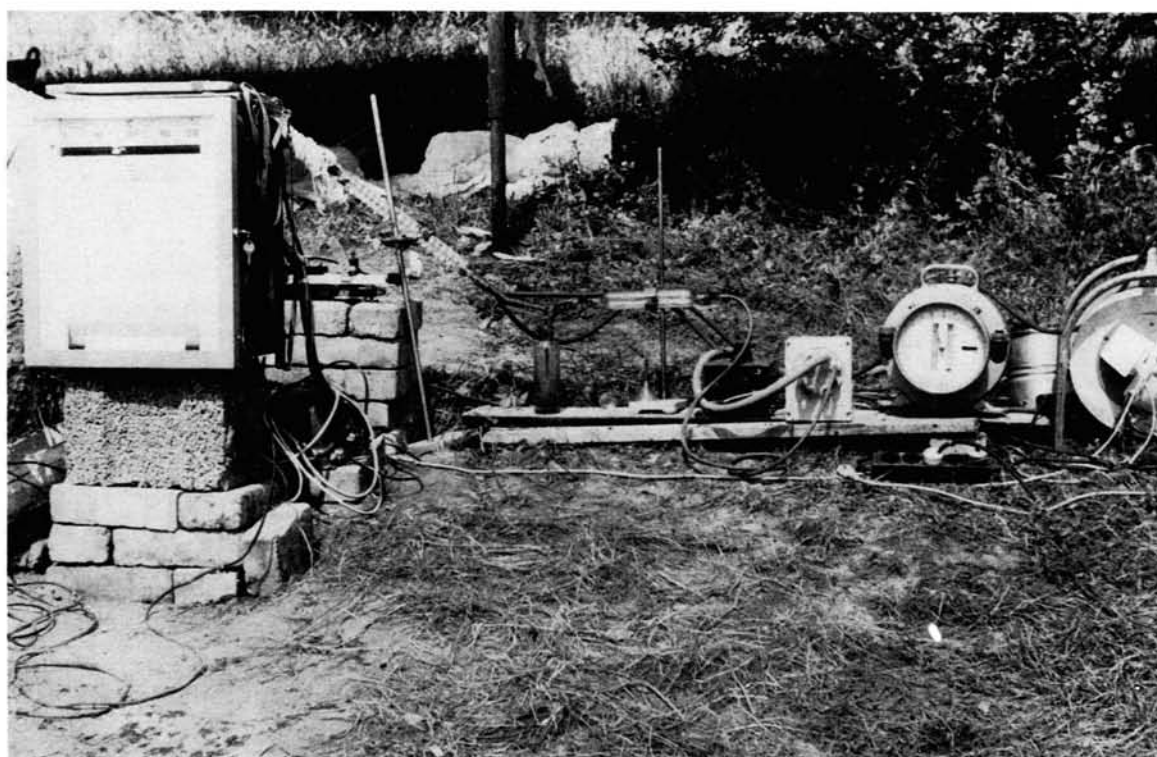


2

1 Schürhalsöffnung nach dem 2. Brand; - 2 Töpferofen während des 3. Brandes



Besatzmasse für 3. Brand.



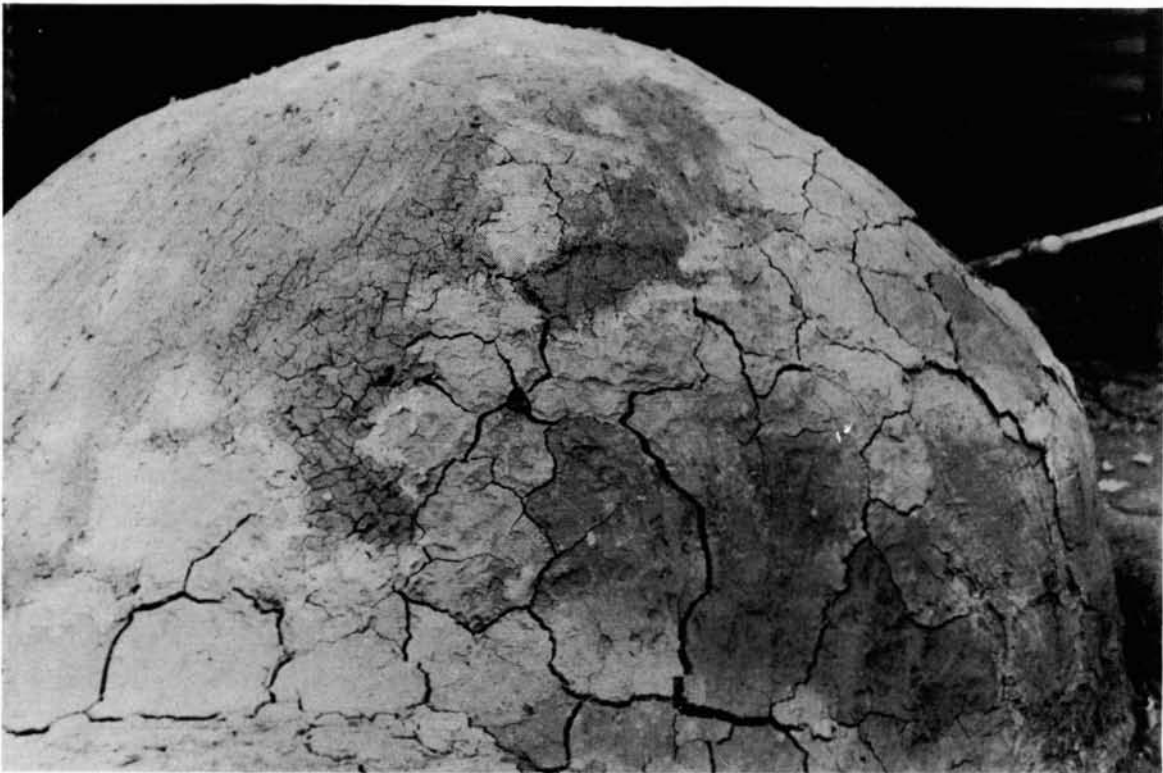
1



2



1



2

1 Überziehen der Ofenkuppel mit Kalkmörtel für den 4. Brand; - 2 Trockenrisse in der Kalkmörtelschicht

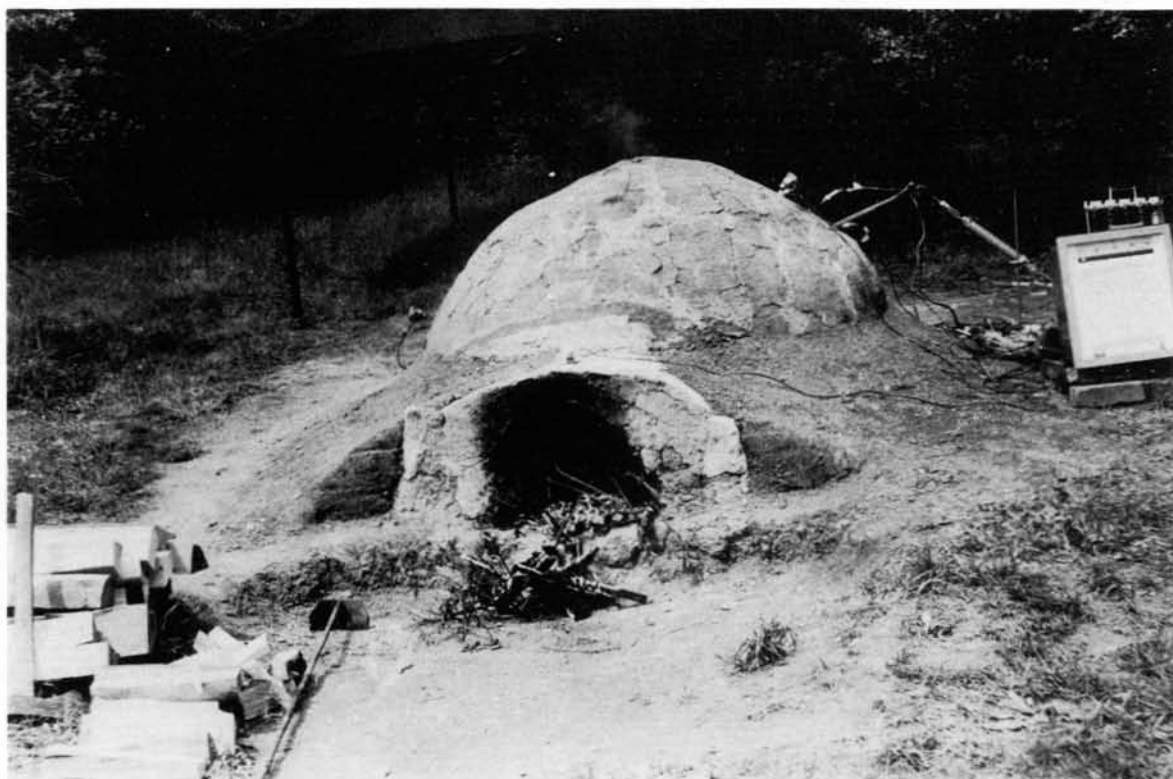


1



2

1 Aufschüren des Ofens während des 4. Brandes; - 2 Ofen vorbereitet für den 5. Brand, sichtbar seitliche Anschüttung lockerer Erde am Schürhals



1



2

1 Ofen vor dem 5. Brand beim Tempern; - 2 Ofen vorbereitet für den 5. Brand



1



2

1 Beschickung des Ofens für den 5. Brand; - 2 Einsetzöffnung mit Besatzmasse für den 5. Brand



1



2

1 Ofen beschickt für den 5. Brand, sichtbar eingesetzte Wölbtopfe beim Verschließen der Einsetzöffnung; - 2 Verschmieren des Ofens mit Kalkmörtel während des 5. Brandes



1



2

1, 2 Abdeckung des Ofens während des 5. Brandes mit Rasensoden



1



2

1 Abdeckung des Ofens mit feuchten Rasensoden während des 5. Brandes; - 2 ganz mit feuchten Rasensoden abgedeckter Ofen während der Kühlphase nach dem 5. Brand



1



2

1, 2 Teilnehmer des internationalen Keramiksymposiums